



Universidade Federal do Rio Grande
Instituto de Matemática, Estatística e Física
Pós Graduação em Modelagem Computacional

Avaliação do Potencial Passível de Conversão em Energia Elétrica das Correntes na Plataforma Continental Sul Brasileira

Eduardo de Paula Kirinus

Orientador: Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Rio Grande, Abril de 2013

Universidade Federal do Rio Grande
Instituto de Matemática, Física e Estatística
Pós Graduação em Modelagem Computacional

Avaliação do Potencial Passível de Conversão
em Energia Elétrica das Correntes na Plataforma
Continental Sul Brasileira

Discente: Oc. Eduardo de Paula Kirinus

Orientador: Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Dissertação apresentada à banca
examinadora da Universidade Federal
do Rio Grande, como exigência parcial
para obtenção do título de Mestre em
Modelagem Computacional pelo Programa
de Pós-Graduação em Modelagem
Computacional.

Abril de 2013

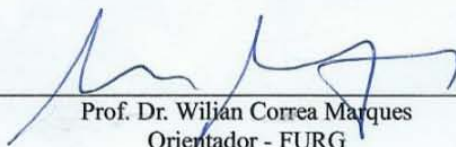
EDUARDO DE PAULA KIRINUS

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PASSÍVEL DE CONVERSÃO EM ENERGIA
ELÉTRICA DAS CORRENTES NA PLATAFORMA CONTINENTAL SUL BRASILEIRA

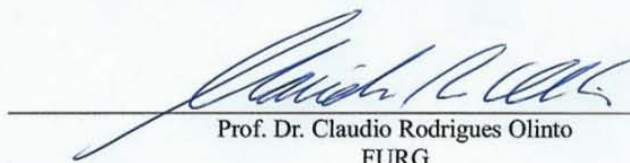
Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Modelagem Computacional da
Universidade Federal do Rio Grande -FURG,
como requisito parcial para obtenção do Grau
de Mestre. Área concentração: Modelagem
Computacional..

Aprovado em

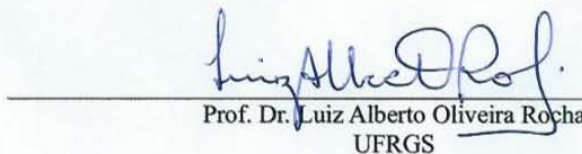
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Wilian Correa Marques
Orientador - FURG



Prof. Dr. Claudio Rodrigues Olinto
FURG



Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha
UFRGS



Prof. Dr. Marcos Eduardo Cordeiro Bernardes
UNIFEI

Rio Grande -RS
2013

K589a Kirinus, Eduardo de Paula.
Avaliação do potencial passível de conversão em energia elétrica das
correntes na plataforma continental sul brasileira / Eduardo de Paula
Kirinus. – 2013.
185 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio
Grande/FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem
Computacional.

Orientador: Dr. Wiliam Correa Marques

1. Correntes costeiras. 2. Potencial elétrico. 3. Sítios de conversão.
4. Telemac3d. 5. Método de elementos finitos. I. Marques, Wiliam
Correa. II. Título.

CDU 621.22

Catálogo na fonte: Bibliotecária Alessandra de Lemos CRB10/1530

Agradecimentos

Primeiramente, aos meus pais, por todo o amor e apoio incondicional durante esses anos.

Ao Prof. Dr. Wilian Correa Marques, que aceitou novamente ser meu orientador, demonstrando ter amplo conhecimento sobre os assuntos discorridos e problemas enfrentados durante a execução desta dissertação. Destaque para seu o humor incompárável e pelos ótimos momentos de descontração.

A todos do grupo do Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina, por proporcionarem o mais irreverente ambiente de trabalho da FURG, com descontração inigualável. Sem esquecer é claro do Pedro Veras Guimarães por toda a ajuda e força dada nas horas mais difíceis, ao Caio Stringari pelos momentos sem paciência que dispendeu para dar qualquer ajuda que fosse.

Aos meus amigos, que não importava a época, estresses e tensões, sempre estavam lá para apoiar e descontraír.

A banca que aprovou a dissertação, apontando correções importantíssimas e extremamente significantes para a continuidade deste trabalho.

Um agradecimento especial a minha namorada Vanice, sem a tua companhia durante esses 2 anos, nada seria possível. Superamos adversidades por todos os momentos que passamos juntos, muito obrigado por cuidar de mim, me incentivar em todos os momentos e me aceitar ao teu lado. Te amo.

**"Perder tempo em aprender coisas que não interessam,
priva-nos de descobrir coisas interessantes."
Carlos Drummond de Andrade**

Resumo

Avaliação do Potencial Passível de Conversão em Energia Elétrica das Correntes na Plataforma Continental Sul Brasileira.

O contínuo crescimento da população mundial aumenta a demanda e a competição por energia, colocando grande esforço sobre as fontes de energia não renováveis existentes. Devido a isso, políticas globais para geração de energias renováveis e menos poluentes estão sendo fortalecidas, além de promoverem o desenvolvimento de novas tecnologias. Várias formas de conversão de energia foram desenvolvidas no decorrer dos anos, com destaque para os conversores de energia das correntes a base de turbinas, que demonstram alta capacidade de conversão energética e já se encontram em funcionamento. O modelo tridimensional TELEMAC3D foi utilizado para a investigação dos processos hidrodinâmicos. Este modelo foi acoplado ao módulo de conversão de energia para as análises nos locais de maior viabilidade e conversão energética na Plataforma Continental do Sul do Brasil. A região de estudo demonstrou possuir duas regiões com alto potencial para a exploração da energias das correntes marinhas, entretanto a região mais viável para a instalação de conversores de corrente é a região norte delimitada entre o Farol da Conceição e o Farol da Solidão, podendo atingir potência média de $10kW/Dia$, e alcançando valores integrados de $3.5MW/Ano$. Através de uma análise da sazonalidade foram observados, durante a primavera os períodos mais energéticos em ambas as regiões estudadas. As maiores intensidades de conversão de energia foram estimadas com variabilidade temporal de 16 dias, demonstrando alta correlação com eventos associados à passagem de frentes meteorológicas na região. O sítio da região norte, com a presença de barreiras que representam a forma dos conversores, se destaca mantendo boa conversão durante os eventos de ótimo potencial energético. Esta melhora se deve ao efeito de intensificação do campo de correntes associado à presença da estrutura física que otimiza a eficiência do sítio. Não foram observadas diferenças significativas no padrão de variabilidade temporal das simulações estudadas, indicando que a presença das barreiras não induz grandes alterações no padrão temporal da conversão de energia nas escalas temporais analisadas neste trabalho. Os eventos de alta geração de energia foram relacionados a incidência de fortes ventos de quadrante sul e norte, indicando que pelo formato e disposição dos conversores, ventos de sudoeste e norte podem favorecer ótimos eventos de conversão de energia. As simulações dos sítios de conversão demonstraram alta capacidade de geração energética, com quatro eventos de extrema geração de energia. Entretanto, o sítio da região norte demonstrou eficiência superior a $59,39 GWh$ ao ano, equivalendo a 0.22% do consumo energético do estado do Rio Grande do Sul no ano de 2010.

Palavras-Chave: Correntes Costeiras; Potencial Elétrico; Sítios de conversão; TE-
LEMAC3D; Método de Elementos Finitos.

Abstract

Evaluating the Power Available for Conversion on the Southern Brazilian Shelf Currents.

The continuous growth of the world population increases the demand and competition for energy, requiring an immense effort for non-renewable energy sources availability. Therefore, in addition to promoting the development of new technologies, global policies for the generation of renewable and clean energy are being strengthened. Several methods of energy conversion have been developed over the years, especially the turbine-based current energy converter, which demonstrated high energy generation capacity and that have already been in operation. The tridimensional model TELEMAC3D was used to investigate the hydrodynamic processes. This model was coupled with the energy conversion module in order to prospect the best energy spots for marine current energy in the Southern Brazilian Shelf. The study area has shown two viable regions with high potential for exploitation of energy from marine currents, however, the more viable region for the installation of current converters is the northern region, bounded between the Conceição Lighthouse and the Solidão Lighthouse, reaching an average power around $10\text{kW}/\text{Day}$ and integrated values of $3.5\text{MW}/\text{Year}$. Through the seasonal analysis, it is estimated that the most energetic periods in both regions occur during Spring. The highest levels of power generation were found at intervals of 16 days, showing high correlation with events associated with the passage of meteorological fronts along the study region. The northern region site, with the presence of the bars which represents the effects of the converters shape, stands out keeping high conversion rates during events of great potential energy. This improvement happens due to the intensification effects of the current field associated with the presence of the physical structure which enhance the efficiency of the site. No significant differences on the temporal variability pattern between the simulations studied were estimated, showing that the presence of the bars does not impact on changes in the energy conversion temporal pattern on the temporal scales studies in this work. The simulation of conversion sites showed high capacity of energy generation, enhanced with four extreme events of high energy generation, although, the northern site was expected to produce annual integrated values of $59,39\text{ GWh}$ per year, which is equivalent to 0.22% of the whole consumption of the Rio Grande do Sul state during 2010.

Keywords: Coastal Currents; Energy Potential; Conversion Sites; TELEMAC3D; Finite Element Method.

Sumário

1	Introdução	p. 5
1.1	Energia das Correntes	p. 8
1.2	Região de Estudo	p. 18
1.3	Objetivo	p. 25
1.3.1	Objetivos Específicos	p. 25
1.4	Estrutura da Dissertação	p. 26
2	Material e Métodos	p. 27
2.1	Módulo Hidrodinâmico - TELEMAC3D	p. 29
2.1.1	Domínio do Modelo	p. 30
2.1.2	Geração da Grade de Elementos Finitos	p. 30
2.1.3	Estruturação das Malhas Batimétricas	p. 31
2.1.4	Discretização vertical da malha	p. 33
2.1.5	Equacionamento do modelo	p. 38
2.2	Energia das Correntes Oceânicas e sua Conversão em Energia Elé- trica	p. 46
2.3	Sítios de Conversão	p. 54
2.4	Período simulado	p. 66

2.5	Condições iniciais e de contorno - simulações numéricas para análise de potencial energético	p. 66
2.5.1	Condições iniciais e de contorno climatológicas - simulações numéricas dos sítios de conversão de energia	p. 71
2.6	Validação do modelo	p. 71
2.7	Tratamento dos resultados	p. 72
3	Resultados	p. 75
3.1	Potencial da conversão de energia na Plataforma Continental do Sul do Brasil	p. 77
3.2	Sazonalidade da Conversão Energética	p. 87
3.2.1	Região Norte	p. 87
3.2.2	Região Sul	p. 94
3.3	Simulação de Sítios de Conversão	p. 106
3.3.1	Análise residual dos conversores	p. 109
3.3.2	Análise da Variabilidade Temporal	p. 114
3.3.3	Análise da Variabilidade Espacial	p. 122
3.3.4	Eventos de alta conversão de energia	p. 128
4	Discussão	p. 132
4.1	Viabilidade da Instalação na Plataforma Continental Sul do Brasil . .	p. 132
4.2	Sazonalidade	p. 135
4.3	Análise dos Sítios de Conversão	p. 137
5	Conclusões	p. 144
6	Trabalhos Futuros	p. 148
6.1	Inclinação com a costa	p. 148
6.2	Difusor	p. 149
6.3	Cavitação	p. 149

6.4	Wake - Efeito esteira	p. 150
6.5	Aquecimento e ruído	p. 151
6.6	Valoração da estrutura	p. 151
6.7	Impactos dos conversores	p. 151
6.8	Atualização do módulo de energia	p. 152
7	Produção Científica Associada ao Trabalho	p. 154
7.1	Artigos completos publicados em periódicos	p. 154
7.2	Artigos completos aceitos para publicação	p. 155
7.3	Artigos submetidos	p. 155
8	Referências	p. 156
9	Anexo I	p. 172
9.1	Como gerar malhas para a simulação de sítios de conversão.	p. 172
9.1.1	Problema 1:	p. 173
9.1.2	Problema 2:	p. 174
9.1.3	Problema 3:	p. 177
10	Anexo II	p. 178
10.1	Configuração do Steering File.	p. 178

Lista de Figuras

1.1	<i>Tipos e sub-divisões das turbinas existentes (Adaptado de Khan et al. 2009).</i>	p. 10
1.2	<i>(a) Pesquisa de Khan et al. (2009) sobre as turbinas existentes variando entre conceito e comercial. Porcentagem de turbinas em relação ao seu tipo. (Adaptado de Khan et al. 2009).</i>	p. 11
1.3	<i>Conversores descritos na tabela 1.1 (Adaptado de Rourke et al. 2010).</i>	p. 15
1.4	<i>Mapa do consumo de energia por município em 2008 (Adaptado de Capeletto and De Moura (2010)).</i>	p. 17
1.5	<i>Área de estudo. (a) Plataforma continental sul do Brasil, com batimetria até -3.500m, com destaque para os quadrados tracejados, a região norte e a região sul estudadas. Destaque na região norte (b), demonstrando a posição dos faróis da Solidão e Conceição. Detalhe da região sul (c), delimitada entre os faróis do Sarita e do Albardão.</i>	p. 19
1.6	<i>Correntes marinhas superficiais e massas de água no inverno. BC: Corrente do Brasil; MC: Corrente das Malvinas; PC: Corrente da Patagônia; BCC/RGC: Corrente Costeira do Brasil ou Corrente do Rio Grande; TW: Água Tropical; SAW: Água Subantártica; SASW: Água Subantártica de Plataforma; PPW: Água da Pluma do Rio da Prata; STSW: Água Subtropical de Plataforma. Fonte: Möller et al. (2008).</i>	p. 22
1.7	<i>Correntes marinhas superficiais e massas de água no verão. Fonte: Möller et al. (2008).</i>	p. 23
2.1	<i>Cobertura geográfica dos dados batimétricos utilizados para geração da grade de elementos finitos.</i>	p. 32

2.2	<i>Detalhe em azul a localização dos dados batimétricos Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande coletados pela empresa Jan de Nul após a dragagem no ano de 2010</i>	p. 34
2.3	<i>Malha tri-dimensional obtida pela superposição da malha bi-dimensional de elementos triangulares (modificado de Hervouet and Van Haren (1996)).</i>	p. 35
2.4	<i>Representação tridimensional dos níveis sigma da malha numérica. . .</i>	p. 37
2.5	<i>a) Turbina axial desenvolvida pela SeaGen (Adaptado de Douglas et al. (2008)); (b) Turbina Helicoidal (Gorlov, 2010).</i>	p. 47
2.6	<i>(A) Demonstração do modelo de Betz. (B) Fluxo homogêneo encontrando o conversor e sofrendo perda de velocidade constante.</i>	p. 49
2.7	<i>Fluxograma da interação entre o modelo TELEMAC3D e o módulo da energia (Adaptado de Marques et al. (2012)).</i>	p. 50
2.8	<i>Área frontal da turbina helicoidal, corresponde ao formato de um cilindro retangular, os vetores representam a velocidade de corrente incidente no conversor.</i>	p. 52
2.9	<i>Curva de potência dos conversores estudados.</i>	p. 54
2.10	<i>Fluxograma das simulações realizadas para a análise dos sítios de conversão.</i>	p. 55
2.11	<i>Grade batimétrica utilizada para a modelagem hidrodinâmica dos sítios de conversão (a), utilizando a morfologia atual da batimetria do estuário. Em detalhe, as regiões do Porto Novo (b), baixo estuário (c) e a desembocadura dos molhes com a configuração mais recente (d,e). Batimetria dada em metros.</i>	p. 56
2.12	<i>Malha refinada para a região norte, com 17.115 pontos. Destaque para a nuvem de pontos criada na malha hidrodinâmica na região norte (a). Destaque do refino da região (b). Local da instalação dos sítios de simulação, distando aproximadamente 12 Km da costa. . . .</i>	p. 57
2.13	<i>Malha refinada para a região sul, com 19.095 pontos. Destaque para a nuvem de pontos criada na malha hidrodinâmica na região sul (a). Destaque do refino da região (b). Local da instalação dos sítios de simulação, distando aproximadamente 5 Km da costa.</i>	p. 58
2.14	<i>Região dos conversores na região norte, composto por 10 turbinas e distando 200m entre si. Em destaque os três conversores da parte inferior (b). Profundidade do sítio é em torno de -18m</i>	p. 60

2.15	<i>Região dos conversores na região sul, composto por 10 turbinas e distando 200m entre si. Em destaque os três conversores da parte inferior (b). Profundidade do sítio em torno de -15.5m</i>	p. 61
2.16	<i>Sítio de conversão de energia com a malha tridimensional utilizada nas simulações da região norte (a). Esta representação demonstra o efeito físico da barreira imposta nas simulações. Profundidade dada em metros.</i>	p. 62
2.17	<i>Relação entre H/R e o coeficiente de eficiência da turbina (Adaptado de Li and Calisal (2010).</i>	p. 64
2.18	<i>Demonstração da relação entre a velocidade incidente (vermelho) e o conversor (amarelo) no módulo de conversão de energia.</i>	p. 65
2.19	<i>Diagrama das condições de contorno do modelo hidrodinâmico TE-LEMAC3D.</i>	p. 68
2.20	<i>Contornos líquidos e superficiais - simulações numéricas utilizadas para o estudo do potencial energético.</i>	p. 69
3.1	<i>(a) Velocidade média de corrente (m/s) e seu desvio padrão (b) durante todo o período de simulação. Em destaque, a região sul na área tracejada em vermelho, e a região norte tracejada em preto.</i>	p. 79
3.2	<i>Análise da potência para a região de interesse ao norte. (a) Energia média (kW/Dia); (b) Desvio padrão da potência (kW/Dia); (c) Energia máxima (kW/Dia); (d) Energia integrada (MW/Ano). A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.</i>	p. 80
3.3	<i>Análise da potência para a região de interesse ao sul. (a) Energia média (kW/Dia); (b) Desvio padrão da potência (kW/Dia); (c) Energia máxima (kW/Dia); (d) Energia integrada (MW/Ano). A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.</i>	p. 82
3.4	<i>Histograma espacial de frequência durante os 730 dias de simulação. A escala de cores representa o número de dia de ocorrência de velocidades de corrente superiores a 0.2m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.</i>	p. 83

- 3.5 *Análise da ondaleta para a região norte. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente e da potência elétrica (kW/Dia) utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de energia local. (c) Espectro cruzado de energia global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.* p. 85
- 3.6 *Análise da ondaleta para a região sul. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente e da potência elétrica (kW/Dia) utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de energia local. (c) Espectro cruzado de energia global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.* p. 86
- 3.7 *Média e Desvio padrão sazonal da velocidade para a **região norte durante o inverno (a,b) e durante a primavera (c,d)** em m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.* p. 89
- 3.8 *Análise da potência para a região de interesse ao **norte durante o inverno (a,b,c) e durante a primavera (d,e,f)**. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.* p. 90
- 3.9 *Média e Desvio padrão sazonal da velocidade para a **região norte durante o verão (a,b) e durante o outono (c,d)** em m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.* p. 92
- 3.10 *Análise da potência para a região de interesse ao **norte durante o verão (a,b,c) e durante o outono (d,e,f)**. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.* p. 93
- 3.11 *Média e Desvio padrão sazonal da velocidade para a **região sul durante o inverno (a,b) e durante a primavera (c,d)** em m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.* p. 95
- 3.12 *Análise da potência para a região de interesse ao **sul durante o inverno (a,b,c) e durante a primavera (d,e,f)**. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.* p. 96

- 3.13 Média e Desvio padrão sazonal da velocidade para a **região sul durante o verão (a,b) e durante o outono (c,d)** em m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade. p. 98
- 3.14 Análise da potência para a região de interesse ao **sul durante o verão (a,b,c) e durante o outono (d,e,f)**. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade. p. 99
- 3.15 Histograma espacial de frequência de acordo com a duração de cada estação do ano para a região norte. A escala de cores representa o número de dias de ocorrência de velocidades de corrente superiores a 0.2m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade. p. 101
- 3.16 Histograma espacial de frequência de acordo com a duração de cada estação do ano para a região sul. A escala de cores representa o número de dia de ocorrência de velocidades de corrente superiores a 0.2m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade. p. 102
- 3.17 Histograma de frequência (%) da intensidade de corrente para as estações do ano. Em vermelho encontra-se o desvio padrão. p. 103
- 3.18 Histograma de frequência (%) da potência para as estações do ano. Em vermelho encontra-se o desvio padrão. p. 105
- 3.19 Numeração dos conversores e a batimetria referente a cada região. (a) Região Norte. (b) Região Sul. p. 107
- 3.20 Sítio de conversão de energia com a malha tridimensional utilizada nas simulações da região norte. Esta representação demonstra o efeito físico da barreira imposta nas simulações. p. 108
- 3.21 Velocidades residuais da corrente e a potência média gerada pelos conversores (kW) para a região norte sem a presença das barreiras. . p. 109
- 3.22 Velocidades residuais da corrente e a potência média gerada pelos conversores (kW) para a região norte com a presença das barreiras. . p. 110
- 3.23 Velocidades residuais da corrente e a potência média gerada pelos conversores (kW) para a região sul sem a presença das barreiras. . . p. 111
- 3.24 Velocidades residuais da corrente e a potência média gerada pelos conversores (kW) para a região sul com a presença das barreiras. . . p. 112

- 3.25 *Série temporal da potência na região norte (em escala logarítmica). Simulação sem o efeito das barreiras (**Preto**) em comparação com a simulação com o efeito das barreiras (**Tracejado vermelho**).* p. 114
- 3.26 *Série temporal da potência na região sul (em escala logarítmica). Simulação sem o efeito da barreira (**Preto**) em comparação com a simulação com o efeito da barreira (**Tracejado vermelho**).* p. 115
- 3.27 *Análise da ondaleta para a região norte, **simulação sem barreira**. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente e da potência elétrica utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de energia local. (c) Espectro cruzado de energia global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.* p. 117
- 3.28 *Análise da ondaleta para a região norte, **simulação com barreira**. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente e da potência elétrica utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de energia local. (c) Espectro cruzado de energia global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.* p. 118
- 3.29 *Análise da ondaleta para a região sul, **simulação sem barreira**. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente e da potência elétrica utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de potência local. (c) Espectro cruzado de potência global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.* p. 119
- 3.30 *Análise da ondaleta para a região sul, **simulação com barreira**. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente e da potência elétrica utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de energia local. (c) Espectro cruzado de energia global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.* p. 120
- 3.31 *Análise espectral cruzada para eventos de escala temporal maiores que 1 dias e menores que 30 dias, entre as séries temporais de potência (kW) e velocidade de corrente (m/s) na região norte para a **simulação sem barreira** (a). Variância média da análise ao longo de todo o tempo, onde os valores abaixo da reta tracejada possuem nível de confiança de 95 % (b) e série temporal da variância espacial média da análise ao longo de todos os conversores (c).* p. 123

- 3.32 *Análise espectral cruzada para eventos de escala temporal maiores que 1 dias e menores que 30 dias, entre as séries temporais de potência (kW) e velocidade de corrente (m/s) na região norte para a **simulação com a barreira** (a). Variância média da análise ao longo de todo o tempo, onde os valores abaixo da reta tracejada possuem nível de confiança de 95 % (b) e série temporal da variância espacial média da análise ao longo de todos os conversores (c).* p. 124
- 3.33 *Análise espectral cruzada para eventos de escala temporal maiores que 1 dias e menores que 30 dias, entre as séries temporais de potência (kW) e velocidade de corrente (m/s) na região sul para a **simulação sem barreira** (a). Variância média da análise ao longo de todo o tempo, onde os valores abaixo da reta tracejada possuem nível de confiança de 95 % (b) e série temporal da variância espacial média da análise ao longo de todos os conversores (c).* p. 126
- 3.34 *Análise espectral cruzada para eventos de escala temporal maiores que 1 dias e menores que 30 dias, entre as séries temporais de potência (kW) e velocidade de corrente (m/s) na região sul para a **simulação com a barreira** (a). Variância média da análise ao longo de todo o tempo, onde os valores abaixo da reta tracejada possuem nível de confiança de 95 % (b) e série temporal da variância espacial média da análise ao longo de todos os conversores (c).* p. 127
- 3.35 *Evento extremo I em Maio. (a) Comportamento do vento (m/s) durante o evento, o retângulo tracejado indica o momento da alta geração energética observado nos sítios. (b) Série temporal da potência no conversor 1 na região norte. (c) Série temporal da potência no conversor 5 na região sul.* p. 129
- 3.36 *Evento extremo II em Setembro e Outubro. (a) Comportamento do vento (m/s) durante o evento, o retângulo tracejado indica o momento da alta geração energética observado nos sítios. (b) Série temporal da potência no conversor 1 na região norte. (c) Série temporal da potência no conversor 5 na região sul.* p. 131
- 4.1 *Gráficos demonstrando as regiões de interesse dentro da plataforma continental interna do Rio Grande do Sul. Em destaque a diferenciação da declividade batimétrica da região norte (a). Em linha tracejada (b) encontra-se o banco do albardão, enquanto que no quadrado de linha sólido encontra-se a fossa do Albardão. As isolinhas representam batimetria.* p. 133
- 6.1 *Exemplo de um difusor em uma turbina hidrocínética.* p. 150

- 9.1 *Inclinação dos conversores criada no matlab. Em azul, inclinação de 60 graus utilizado para a região sul, enquanto em vermelho a inclinação de 45 graus adotada para a região norte. p. 173*
- 9.2 *Momento quando os conversores são inseridos no Matisse, e ficam dispostos incorretamente. O formato correto encontra-se em amarelo no centro p. 174*
- 9.3 *Batimetria interpolada para a região norte, em vermelho dista 200x200 enquanto que a azul possui 2x2 de distância. p. 175*
- 9.4 *Pontos adicionados manualmente ao redor dos conversores da região norte, com batimetria de 18m. p. 176*
- 9.5 *Pontos alterados manualmente ao redor dos conversores da região norte no modo MESH, note que os conversores ficaram com zero de batimetria. p. 176*

Lista de Tabelas

1.1	Status das tecnologias para a geração de energia através das correntes marinhas (Adaptado de Rourke et al. 2010).	p. 13
2.1	Análise de grandeza para a equação 2.23.	p. 51
2.2	Parâmetros técnicos das turbinas.	p. 52
2.3	Parâmetros utilizados no sítios de conversão.	p. 63
2.4	Parâmetros utilizados na simulação.	p. 72
3.1	Períodos selecionados durante os 730 dias de simulação. Note que a estação do verão possui menor período devido ao tempo de simulação escolhido.	p. 87
3.2	<i>Potência (kW) gerada pelos conversores. Méd= Média; Máx= Máximo; Desv= Desvio Padrão; Int= Integrado.</i>	p. 121
9.1	Critérios adotados.	p. 177

Lista de Símbolos

Módulo da Energia

A	Área da Turbina (m^2)
η	Coefficiente de eficiência da turbina
ρ	Massa específica da água (Kg/m^3)
H	Altura do conversor (m)
R	Raio da turbina (m)
v	Velocidade da corrente incidente (m/s)
P	Potência (W)

TELEMAC

F_x	Termo fonte do momento da equação u
F_y	Termo fonte do momento da equação v
F_z	Termo fonte do momento da equação w
g	Aceleração gravitacional (m/s^2)
t	Tempo (s)
u	Primeira componente da velocidade (m/s)
v	Segunda componente da velocidade (m/s)
w	Terceira componente da velocidade (m/s)
Z	Elevação da superfície (m)
ν	Coefficiente de viscosidade cinemática (m^2/s)
P, p	Pressão
ρ_0	Densidade de referência
$\Delta\rho$	Variação da densidade
S	Elevação da superfície livre do mar
ω	Velocidade angular de rotação da Terra ($7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$)
f	Coefficiente de coriolis
C_f	Coefficiente de fricção adimensional
A	Coefficiente de troca de calor ($Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$)
ν	Viscosidade Cinemática
$\vec{W}$	Intensidade do vento (m/s)
(ϕ)	Latitude em graus

F_{fonte}	Taxa de criação da fonte
q	Fluxo decorrente da difusão molecular ou turbulenta
v_T	Coeficiente de difusão
Q	Fonte ou sumidouro de traçador
a_{vento}	Coeficiente de influência do vento
T	Temperatura (K)
m	Coeficiente de Manning
h	Profundidade da água
z_f	Profundidade local medida na malha
z_s	Elevação da superfície livre
z^*	Sistema Sigma
t_i	Tempo inicial
t_f	Tempo final
Δt	Tempo total da simulação

Lista de Abreviaturas

EPA	Environmental Protection Agency
EPRI	Electric Power Research Institute's
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MCT	Marine Current Turbines
PSCB	Plataforma Continental Sul do Brasil
WEC	World Energy Council

Capítulo 1

Introdução

O contínuo aumento da população mundial e a mudança do estilo de vida da população têm constantemente aumentado a demanda por energia, fato que rapidamente vem diminuindo os recursos não renováveis e aumentando a pressão sobre o meio ambiente. Atualmente, a sociedade precisa enfrentar grandes desafios para fornecer energia para a comunidade por intermédio de soluções sustentáveis e preservando a qualidade ecológica. O rápido aumento global das necessidades energéticas mantém uma escalada da concorrência sobre os recursos disponíveis e também o aumento dos preços da energia repassada à população.

De uma forma geral, os recursos não renováveis convencionalmente têm a tendência para a deterioração da qualidade ecológica, liberando uma quantidade excessiva de dióxido de carbono (CO_2) e outros poluentes na atmosfera. Por outro lado, fontes de energia renováveis como: a solar, eólica, biomassa, térmica dos oceanos e a energia mecânica dos oceanos (proveniente das ondas e correntes), são alternativas emergentes, que podem suprir uma parte da crescente demanda de energia com menores impactos

ao meio ambiente (Cruz and Sarmento, 2007).

Atualmente os países industrializados se encontram quase totalmente dependentes dos combustíveis fósseis e o consumo energético no mundo, nas últimas três décadas, aumentou cerca de 70% (Bollmann et al., 2010). Em face desta premissa, houve um intenso avanço do desenvolvimento e utilização das energias renováveis, principalmente em terra (energia dos ventos e solar). As energias renováveis de fontes marinhas, por outro lado, permanecem ainda pouco exploradas ou desconhecidas.

As fontes alternativas de energia possuem custos mais altos de utilização quando comparadas às fontes convencionais e, neste sentido têm sido historicamente pouco atraentes para os investidores. Entretanto, esta tendência vem se alterando ao longo dos últimos anos, pois no ano de 2004, por exemplo, o custo da conversão de energia eólica caiu em 80% após um período de 30 anos, e neste sentido a capacidade eólica instalada tem sido aumentada significativamente (NCEP, 2004). Embora pudessem ter sido tão exploradas quanto a energia eólica, a energia das ondas e a energia das correntes continuam ainda pouco exploradas devido ao seu alto custo de implantação (Brown et al., 2006).

Atualmente, os países que comandam os avanços das pesquisas na conversão de energias oceânicas são: Reino Unido, França, Suécia, Noruega, Países Baixos, Dinamarca, Suécia, Irlanda, Portugal, Espanha, Canadá, Federação Russa, China, Índia, Coreia, Austrália e Japão (WEC, 2004, 2007). Os Estados Unidos têm alcançado inovações na área de pequenas fazendas de conversão de energia tanto para a iniciativa privada quanto para a comunidade.

Nos últimos dois séculos, o consumo de energia per capita aumentou por um fator de

20 e mais de 80% desta energia é fornecida pelos combustíveis fósseis, principalmente nos Estados Unidos (Bollmann et al., 2010). Atualmente, apenas 13,5% da energia primária mundial é fornecida pelos recursos renováveis embora o "correto" uso destes recursos seja capaz de suprir muitas vezes a atual demanda global (Asif and Muneer, 2007).

As regiões costeiras estão entre as regiões de crescimento mais rápido do mundo, gerando fortes pressões populacionais como para o abastecimento de água e energia. Em escala global, o panorama não é muito diferente, pois mais da metade da população dos Estados Unidos, por exemplo, vive a 80 *km* do litoral, próxima aos recursos energéticos marinhos (EPA, 2005). O crescimento da população nos estados ao longo da costa sudeste (Carolina do Norte, Carolina do Sul, Geórgia e Flórida) exige um maior fornecimento anual de energia enquanto a crescente pressão sobre o ambiente se acentua.

Desenvolvimentos recentes demonstraram uma redução dos impactos ambientais quando o dispositivo de conversão é completamente submerso. Através de diversos estudos independentes, foi demonstrado que o impacto sobre os peixes e mamíferos marinhos é baixo devido ao lento movimento de tais dispositivos (EPRI, 2006). Existem muitas tecnologias emergindo para converter a energia destes recursos em energia elétrica. Entretanto, o primeiro passo para a conversão destes recursos consta no mapeamento abrangente dos mesmos, onde é esperado determinar a viabilidade e a acessibilidade das fontes, assim como o nível de conversão que pode ser atingido.

1.1 Energia das Correntes

A energia das correntes pode ser captada de duas formas: através da energia potencial (devido a variações no nível do mar) ou da energia cinética, a qual consiste em aproveitar essencialmente a velocidade das correntes e de massas de água associadas. A técnica utilizada, de uma forma geral, pode ser definida como eólica submarina, tendo aproximadamente os mesmos princípios de funcionamento e só diferindo o fluido com a qual interagem.

Gorlov (2001), estudando a circulação gravitacional e algumas aplicações para a extração de energia, concluiu que estas são fontes substanciais de energia renovável para as futuras gerações. A agência Canadense de Hidrologia CHC (Canadian Hydraulics Institute) realizou um estudo utilizando modelagem numérica que mapeou a costa canadense produzindo um mapa dos recursos energéticos de fonte marinha da região, considerando as ondas geradas pelo vento e as correntes de maré (Cornett, 2006). Neste estudo foi verificado que a potência elétrica média disponível nos 190 pontos analisados equivaleria a aproximadamente 63% da demanda de energia canadense.

Um estudo similar foi realizado por Hall et al. (2006) nos Estados Unidos, onde os autores identificaram as regiões com os maiores potenciais para a utilização de hidroenergia considerando como de baixo potencial as regiões com potência média anual de até 1 MW/ano, e de médio e alto potencial, as regiões com potência média anual entre 1 e 30 MW/ano. De acordo com Khan et al. (2009), a energia dos fluxos de rios e estuários, correntes de marés e outros canais de água artificiais podem ser considerados como uma fonte viável de energia renovável. Defne (2010) investigou o potencial energético das ondas geradas pelo vento e correntes de maré na costa sudeste dos Estados

Unidos, através da análise de dados e modelagem numérica, onde verificou um possível potencial de conversão que varia entre 1.0 e 3.0 MW/ano.

Os estudos e a efetiva conversão de energia a partir das marés astronômicas ou meteorológicas estão em um estágio bem avançado de desenvolvimento. Países como: Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Irlanda do Norte, Escócia, entre outros, já possuem um inventário do potencial energético de seus recursos hídricos e respectivas zonas costeiras, onde se verificam as características de sazonalidade e tendências de médio prazo, bem como o potencial médio de cada região.

Apesar do alto potencial energético associado aos recursos hídricos, quando analisamos do ponto de vista estrutural, os sistemas de conversão de energia hidrocínética ainda apresentam custos elevados de produção. Devido à grande atenção dada ao desenvolvimento de novas fontes de captação energética, houve também, um aumento na diversidade de tecnologias existentes para a obtenção energética de forma limpa e sustentável (Gorlov, 2001).

Neste sentido, o desenvolvimento de conversores mais modernos e eficientes, com menor custo e ambientalmente amigáveis, os quais podem ser utilizados em ambientes de fluxo livre, como as turbinas de hélice tripla, vêm tornando a conversão de energia de ambientes marinhos passível de ser utilizada em todo o mundo (Gorlov, 2001).

Khan et al. (2009) realizaram um estudo recente sobre os equipamentos de captação de energia aplicados para corpos de água existentes em funcionamento ou ainda em fases iniciais de pesquisa. Estes autores encontraram ao todo 76 equipamentos existentes, que incluem sistemas convencionais com a utilização de turbinas e sistemas não convencionais que não utilizam turbinas, sendo que, com algumas exceções, cada equipamento

foi desenvolvido para aplicação em determinado local, correspondendo às características físicas e espaciais do local a ser instalado. As turbinas que mais se destacam para este uso, segundo Khan et al. (2009), são as axiais e as helicoidais.

As turbinas utilizadas para conversão de energia de correntes marinhas podem ser divididas (figura 1.1) em dois principais tipos: de eixo horizontal (conversores axiais) e de eixo vertical (conversores darrius e helicoidais), sempre levando em consideração a orientação da corrente incidente.

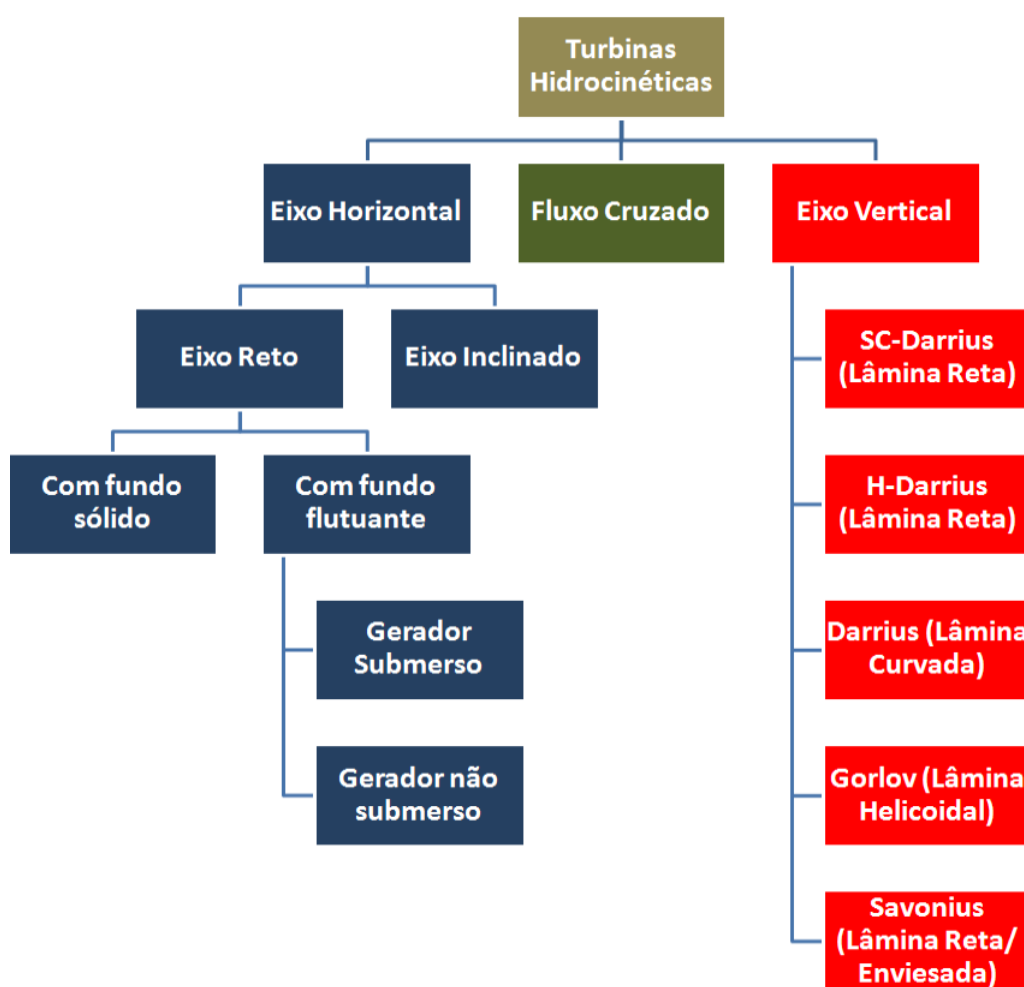


Figura 1.1: Tipos e sub-divisões das turbinas existentes (Adaptado de Khan et al. 2009).

Khan et al. (2009) analisaram as turbinas existentes (figura 1.2 a.) demonstrando que existe dominância de turbinas axiais com capacidade comercial, por outro lado, outras turbinas predominam como conceito e sistemas parcialmente completos. Entretanto, ao abordar a porcentagem de turbinas em relação ao seu tipo (figura 1.2 b.), os autores encontraram grande dominância das turbinas axiais e verticais (43% e 33% respectivamente).

A escolha do rotor adequado para cada local depende de fatores econômicos, políticos, técnicos e ambientais (Khan et al., 2008; Grabbe et al., 2009; Guney and Kaygusuz, 2010; Vennell, 2011; Marques et al., 2012). Como as energias renováveis são emergentes, atualmente, estes fatores se tornam ainda mais relevantes.

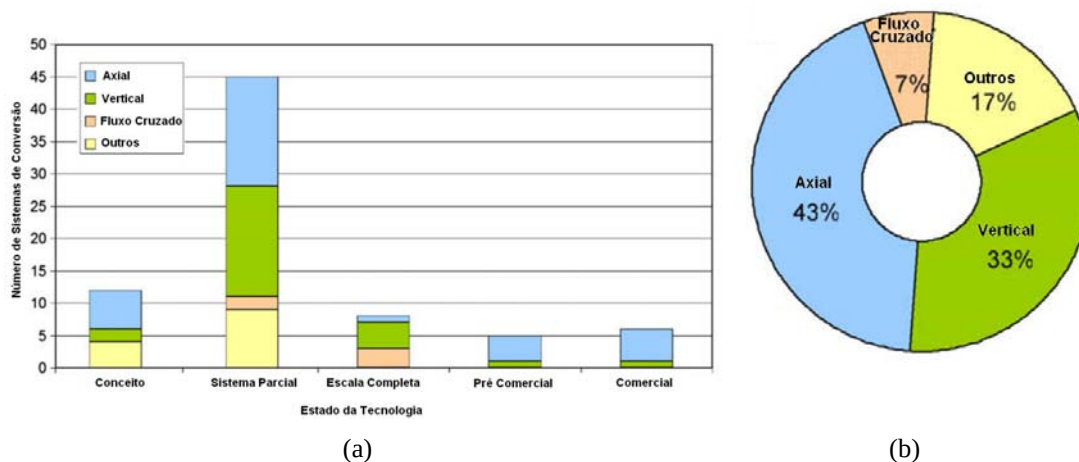


Figura 1.2: (a) Pesquisa de Khan et al. (2009) sobre as turbinas existentes variando entre conceito e comercial. Porcentagem de turbinas em relação ao seu tipo. (Adaptado de Khan et al. 2009).

Atualmente, a tecnologia para geração de energia através das correntes marinhas ainda se encontra em estágios iniciais com apenas alguns modelos conectados às redes

elétricas (Gross, 2004). As turbinas de larga escala instaladas atualmente são a: turbina SeaGen e a turbina SeaFlow (Douglas et al., 2008; Fraenkel, 2007) da Marine Current Turbines (MCT), Tidal Stream Turbine (Hammerfest Strom AS, Norway), e o modelo em escala da Open Centre Turbine (Open-Hydro Ltd., Ireland, ver tabela 1.1).

Em alguns países, já existem protótipos instalados há alguns anos. No ano de 2003, foi instalado com sucesso um protótipo a 1 km ao largo de Foreland Point, perto de Devon, no Reino Unido, a uma profundidade de 30 m. Este protótipo possui um rotor simples de 15 m de diâmetro e pode gerar 300 KW de potência elétrica máxima com uma velocidade de corrente de 2.7 m/s. No ano de 2006, a companhia responsável recebeu permissão para instalar um dispositivo com um rotor duplo, capaz de produzir 1 MW, em Strangford Lough, na costa da Irlanda do Norte, cujo intuito foi de confirmar o potencial comercial desta tecnologia. Este protótipo foi ligado à rede elétrica com o objetivo de converter energia das correntes do mar de forma bidirecional (MCT, 2006).

Outro exemplo é o Kobold, que consiste de uma turbina de eixo vertical que converte energia a partir das correntes marinhas. O seu desenvolvimento começou no ano de 1995 e seu protótipo contém um rotor de eixo vertical ligado a um gerador síncrono. Uma característica importante do Kobold é que a direção de rotação do rotor é independente da direção da corrente. No ano de 2002, uma unidade deste protótipo foi instalada no estreito de Messina, ao largo da Itália, a cerca de 200 m da costa, o qual continua desde então em operação ligado à rede elétrica. Os testes indicaram que a turbina produz 25 KW com uma velocidade da corrente de 1.8 m/s (Matacena, 2002).

O Brasil possui aproximadamente 8.000 km de costa e, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), cerca de 80% da população brasileira vive a menos de 200 km do litoral. O consumo de energia elétrica da população

Tabela 1.1: Status das tecnologias para a geração de energia através das correntes marinhas (Adaptado de Rourke et al. 2010).

Empresa	Dispositivo	Informações	Dimensões	Status
Aquamarine Power Ltd. (UK)	Neptune Tidal Stream Turbine	Rotores gêmeos de eixo horizontal.	Nada construído	O dispositivo está em estágio de design.
Fonte: Aquamarine (2008)		Design com 3 lâminas		São esperados testes para o início de 2011
Atlantis Resource Corporation PTE Ltd. (Singapura)	Nereus and Solon Tidal Turbines	Eixo de rotação horizontal	12 m x 4 m	As turbinas Nereus e Solon foram testadas com sucesso em 2008.
Fonte: Atlantis (2008)		Nereus é extremamente robusto Solon é uma turbina aquática canalizada ao fundo	(Nereus) e 16 m diâmetro (Solon)	
Blue Energy Ltd. (Canadá)	Tidal Fence Davis Hydro Turbine	Turbinas fixas em uma linha conhecida como grade de maré.	Nada construído	O dispositivo está em estágio de design.
Fonte: Energy (2008c)		Eixo de rotação vertical Design com 4 lâminas		
Engineering Business Ltd. (UK)	Stingray Tidal Energy Converter	Dispositivo alternativo Utiliza um gerador hidráulico	Desconhecido	Em setembro de 2002 um protótipo foi instalado em Yell Sound, fora da costa de Shetland e então foi removido semanas depois
Fonte: Business (2008)				
GCK Technology Ltd. (EUA)	Gorlov Helical Turbine	Eixo vertical de rotação Utiliza lâminas torcidas	1 m diâmetro 2.5 m de altura	O dispositivo foi instalado no Estreito de Uldolmok na costa da Coreia do Sul.
Fonte: Technology (2008)				
Hammerfest Strom AS (Noruega)	Tidal Stream Turbine	Eixo horizontal de rotação Design com 3 lâminas	20 m diâmetro	Instalado em Kvalsundet na cost norte da Noruega em Setembro de 2003.
Fonte: AS. (2007)				
Lunar Energy Ltd. (UK)	Lunar Energy Tidal Turbine	Eixo horizontal de rotação Motor e Gerador Hidráulico	Diâmetro de 11.5m foi proposto	O dispositivo está em estágio de design. A Lunar fez um acordo de £500 milhões para instalar 300 turbinas na costa da Coreia do Sul.
Fonte: Energy (2008b)				

Empresa	Dispositivo	Informações	Dimensões	Status
Marine Current Turbines Ltd. (UK) Fonte: MCT (2008)	SeaGen	Rotores Gêmeos de eixo Horizontal, com duas lâminas	2 m x 16 m de diâmetro	Instalado em Maio de 2008 em Strangford Lough, Irlanda e está conectado a rede.
Ocean Flow Energy Ltd. (UK) Fonte: Energy (2008a)	Evopod Tidal Turbine	Eixo de rotação horizontal. Estrutura fundeada com design de 5 lâminas	1.5 m de de diâmetro	Um modelo em escala 1/10 está sendo testado em Strangford Lough, Irlanda do Norte.
Open-Hydro Ltd. (Irlanda) Fonte: OpenHydro (2008); Refocus (2008)	Open Centre Turbine	Centro do rotor e estator abertos. Com eixo de rotação horizontal	6 m de de diâmetro	Instalado em Orkney, Escócia. Conectado a rede elétrica do Reino Unido desde Maio de 2008.
Pulse Generation Ltd. (UK) Fonte: Generation (2008)	Pulse Tidal Hydrofoil	Dispositivo alternativo Utiliza um gerador hidráulico	Desconhecido	Dispositivo em estágio de design. Em abril de 2008 foi dada permissão para instalar um protótipo no Estuário de Humber, no Reino Unido.
SMD Hydrovision Ltd. (UK) Fonte: Hydrovision (2008)	TidEl Stream Generator	Rotores Gêmeos de eixo horizontal. Estrutura fundeada. 2 lâminas	2 m X 1.5 m de de diâmetro	Um modelo em escala 1/10 está sendo testado. O dispositivo está em desenvolvimento.
Tidal Energy Ltd. (UK) Fonte: Energy (2008d)	DeltaStream Turbine	Eixo de rotação horizontal Design com 3 lâminas	Diâmetro de 15 m foi proposto	Dispositivo em estágio de design e a produção completa está prevista para 2009.
Verdant Power Ltd. (EUA) Fonte: Power (2008)	Free Flow Turbine	Eixo de rotação horizontal Design com 3 lâminas	4.68 m de diâmetro	Instalado em East river Nova Iorque em 2007 com a intenção de se instalar um sítio de dispositivos no rio St. Laurence entre 2010–2012.



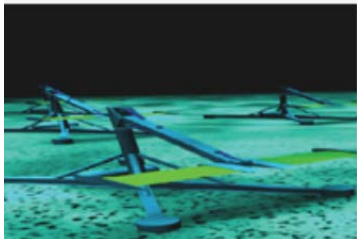
(a) Neptune Tidal Stream Turbine



(b) Nereus and Solon Tidal Turbines



(c) Tidal Fence Davis Hydro Turbine



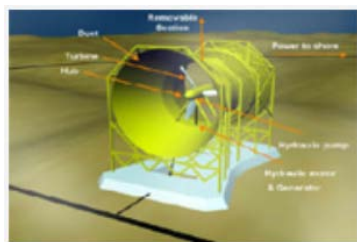
(d) Stingray Tidal Energy Converter



(e) Gorlov Helical Turbine



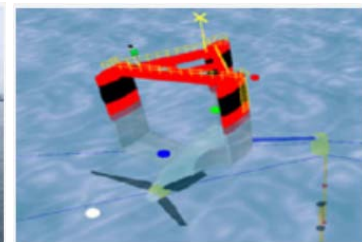
(f) Tidal Stream Turbine



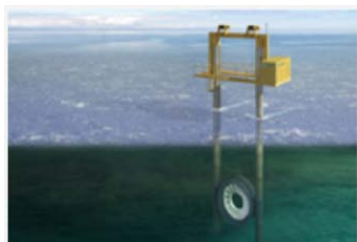
(g) Lunar Energy Tidal Turbine



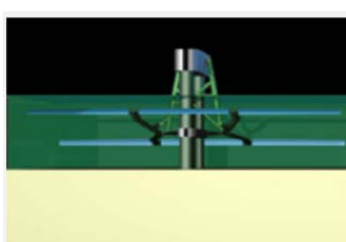
(h) SeaGen



(i) Evopod Tidal Turbine



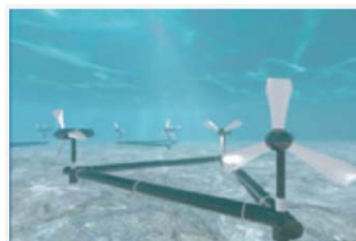
(j) Open Centre Turbine



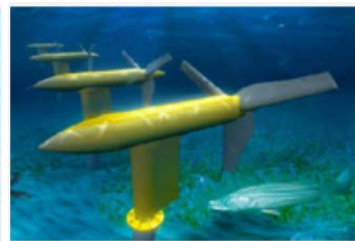
(k) Pulse Tidal Hydrofoil



(l) TidEl Stream Generator



(m) DeltaStream Turbine



(n) Free Flow Turbine

Figura 1.3: Conversores descritos na tabela 1.1 (Adaptado de Rourke et al. 2010).

brasileira no ano de 2010 foi de 428,3 TWh, valor superior ao limite de produção energética do país, que ainda depende de 8,3% de energia externa (Capeletto and De Moura, 2010). No entanto, ainda não existe um mapeamento da zona costeira brasileira no que diz respeito ao potencial energético utilizável para a conversão em energia elétrica através da utilização de turbinas hidrocinéticas.

Capeletto and De Moura (2010) publicaram o Balanço Energético do Rio Grande do Sul para 2009, e registaram que o consumo energético do estado foi equivalente a 26,5 TWh com possibilidade de alcançar no ano de 2015 a margem dos 34 TWh. Este documento retrata a atual situação elétrica do país e do estado, entretanto, cita brevemente o uso de energias renováveis como possível solução ou mitigação para o problema energético do país. A cidade de Rio Grande passa atualmente por um grande aumento populacional devido às alterações sócio-econômicas da região, potencializados pelo crescimento do seu polo naval, e de acordo com Capeletto and De Moura (2010), a cidade se encontra na segunda maior faixa de consumo energético do estado do Rio Grande do Sul, podendo consumir até 1 TWh de energia (figura 1.4).

Marques et al. (2012), em um estudo preliminar investigaram a influência da instalação de turbinas hidrocinéticas na Plataforma Continental do Sul do Brasil, identificando as possíveis alterações nos processos naturais hidrodinâmicos e morfodinâmicos nesta área. Os resultados deste estudo são positivos em relação ao uso das correntes costeiras a fim de obter energia elétrica, onde um valor integrado médio anual de aproximadamente 5 GW/ano foi obtido através da utilização de 6 conversores axiais. Neste estudo, os autores verificaram que os conversores de energia absorvem parte da energia cinética das correntes marinhas, gerando zonas de divergência e convergência de correntes, de acordo com a direção preferencial das mesmas. A maior consequência observada no

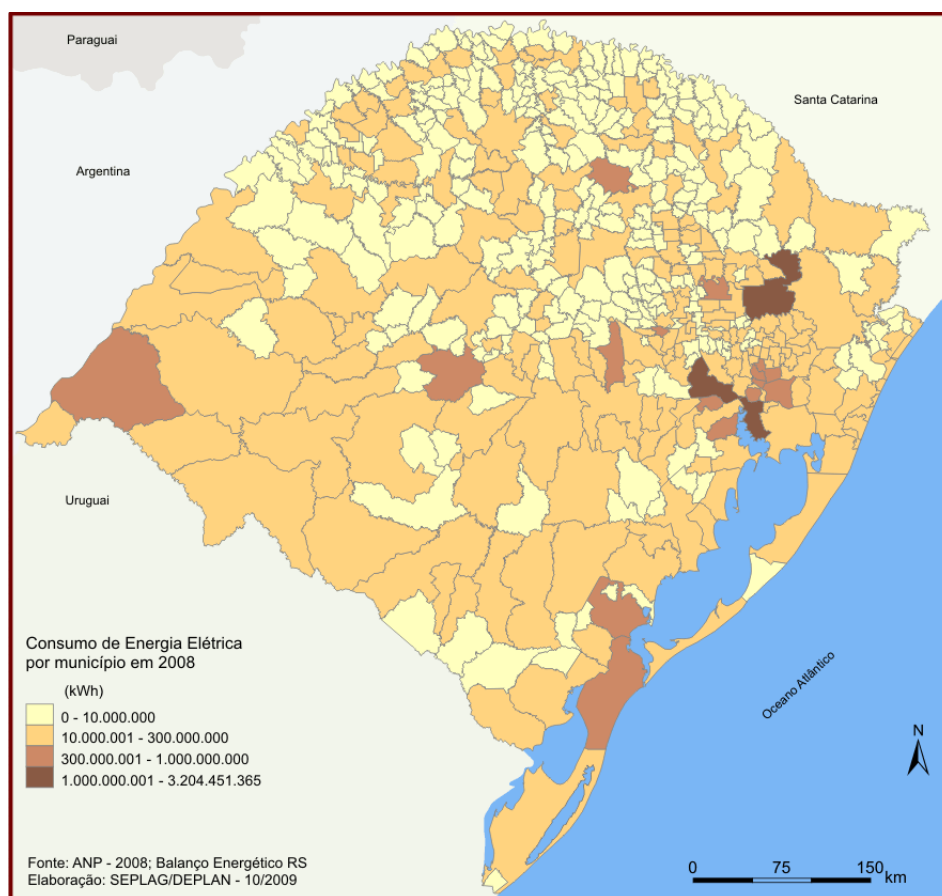


Figura 1.4: Mapa do consumo de energia por município em 2008 (Adaptado de Capelletto and De Moura (2010)).

ecossistema, durante o período estudado, foi o decréscimo da intensidade das correntes, o aumento da concentração de sedimentos suspensos e da evolução do fundo, nas proximidades dos conversores.

Mais recentemente, Kirinus et al. (2013a) demonstraram que a Plataforma Continental do Sul do Brasil possui duas regiões com ótimo potencial energético, onde a região mais viável se encontra na região no entorno do Farol da Conceição, distante 11km da costa com profundidade de 18m vide figura 1.5. Nesta região a produção média de energia pode alcançar 40 MWh e ainda valores integrados de 13GWh/ano. Além disso,

os autores determinaram através de um estudo de sazonalidade que, durante a primavera, ocorrem os eventos mais propícios à geração de energia. Estes autores concluíram que sítios de conversão de energia das correntes são fontes de energia qualificadas para incrementar a matriz energética brasileira, por serem viáveis e inesgotáveis.

1.2 Região de Estudo

A Plataforma Continental Sul do Brasil (PCSB), localizada entre 28 °S e 35 °S (figura 1.5), apresenta uma linha de costa pouco acidentada, com orientação Nordeste - Sudoeste, formando um ângulo de aproximadamente 37° de inclinação em relação ao Norte geográfico. A batimetria desta região é bastante suave, com maior declividade e quebra de plataforma localizada por volta da isóbata de 180m (figura 1.5), possuindo uma tendência de alargamento da plataforma continental em direção ao sul, característica da margem continental da América do Sul (Zembruski, 1979).

Esta região é também caracterizada por ser uma área de grande interesse econômico, largamente utilizada para navegação, em função dos Portos de Rio Grande, Montevideu e Buenos Aires, e também pela intensa atividade pesqueira, onde são capturados alguns dos principais recursos pesqueiros do litoral brasileiro (Haimovici et al., 1998). Isto em parte é devido à alta biomassa fitoplanctônica sustentada pela descarga da Lagoa dos Patos, pela pluma do Rio da Prata, e pela ressurgência na quebra da plataforma (Ciotti et al., 1995).

O estuário do Rio da Prata é a maior fonte de água doce para a Plataforma Continental adjacente na região sudoeste do Atlântico Sul, com uma descarga média de 23.000 m^3/s (Piola et al., 1999, 2004) e picos que chegam a mais de 60.000 m^3/s em anos de

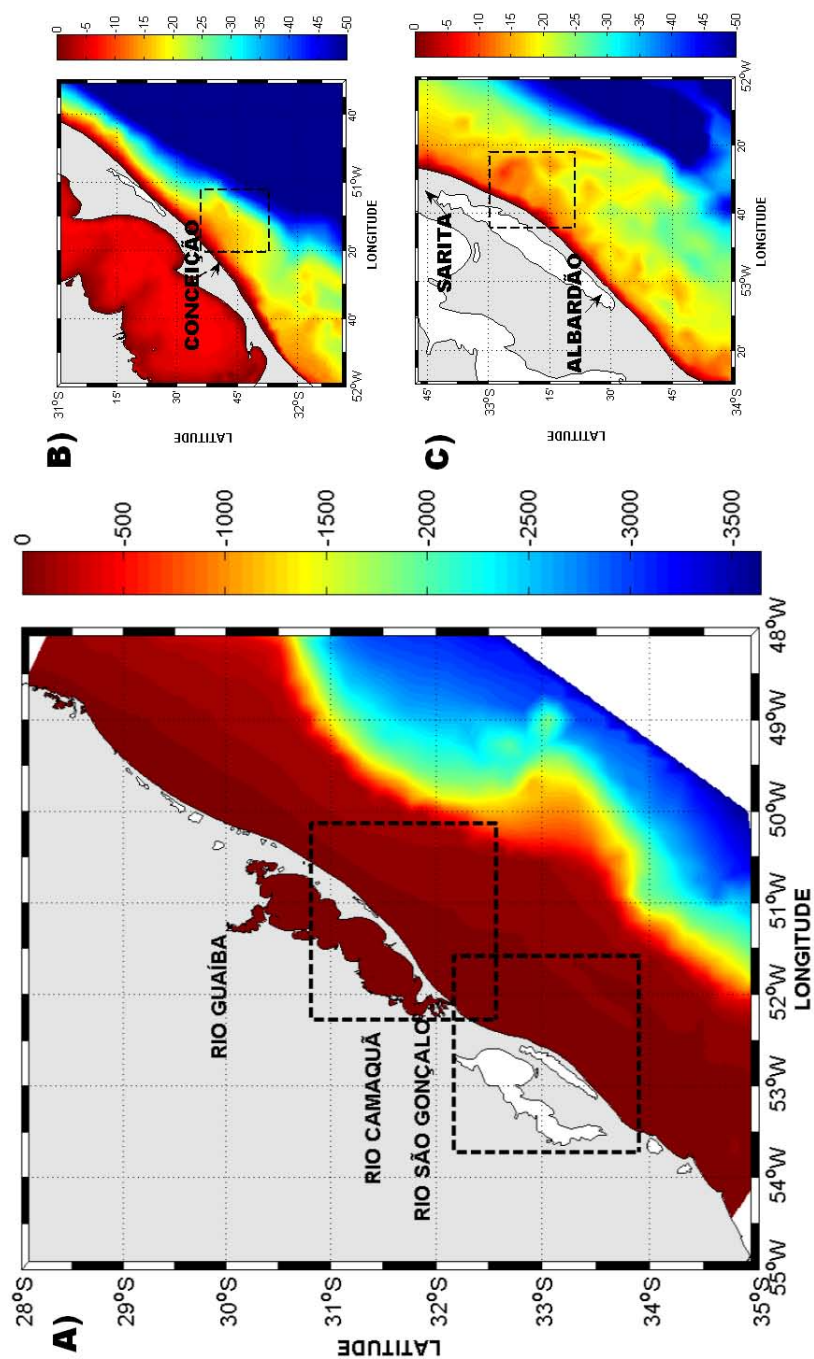


Figura 1.5: Área de estudo. (a) Plataforma continental sul do Brasil, com batimetria até -3.500m, com destaque para os quadrados tracejados, a região norte e a região sul estudadas. Destaque na região norte (b), demonstrando a posição dos faróis da Solidão e Conceição. Detalhe da região sul (c), delimitada entre os faróis do Sarita e do Albardão.

eventos El Niño (Piola et al., 2005). As águas oriundas do Rio da Prata formam uma pluma que apresenta forte variação sazonal e interanual (Piola et al., 2005; Möller et al., 2008) em seu deslocamento para o norte, podendo, no inverno, alcançar regiões distantes cerca de 1.000 km da desembocadura do Rio da Prata. No verão, esta pluma recua para uma posição ao sul de 32° de latitude.

Os aportes de água doce da Lagoa dos Patos, cuja desembocadura está próxima da latitude de 32 °S, apresentam vazão média de 2.400 m³/s (Vaz et al., 2006; Barros G. P. and Marques, 2012; Marques, 2012), podendo alcançar picos de 12.000 m³/s também em anos de evento El Niño (Möller Jr. and Castaing, 1999; Barros G. P. and Marques, 2012; Marques, 2012). Durante eventos de fortes vazantes, esta água de origem continental se mistura à água presente na plataforma continental adjacente, formando uma camada flutuante de menor densidade, que pode ser misturada à Pluma do Rio da Prata (Burrage et al., 2008; Marques, 2009; Marques et al., 2010b,a, 2012). O aporte de água doce dos rios afluentes ao sistema é máximo durante o final de inverno e primavera, e mínimo no verão e outono (Marques, 2012; Vaz et al., 2006).

A PCSB é uma região caracterizada por uma grande variabilidade espacial e temporal de variáveis oceanográficas como: temperatura, salinidade, concentração de clorofila, nutrientes entre outros, como propriedades intrínsecas que são relacionadas às diversas massas d'água encontradas na região (Castro et al., 2006). Com exceção das correntes de maré, as principais fontes geradoras destes movimentos podem estar associadas ao regime de ventos e aos efeitos produzidos por correntes de contorno oeste, além de eventuais processos ligados à flutuabilidade introduzida pela descarga dos rios. É comum distinguir uma porção proximal e uma porção distal da plataforma continental, referidas respectivamente, como plataforma interna e plataforma externa, as quais

são geologicamente separadas pela isóbata de 50m (Mendes, 1994).

O Oceano Atlântico Sudoeste é uma das regiões mais dinâmicas do oceano global (Chelton et al., 1990; Piola and Matano, 2001), sendo caracterizada por grandes contrastes termohalinos e intensa atividade de mesoescala (Gordon, 1989). Além da região da Confluência Brasil-Malvinas, conhecida pela alta variabilidade espacial e temporal (Podestá, 1997; Souza and Robinson, 2004), o Oceano Atlântico Sudoeste compreende a região costeira da PCSB, ambientes subtropicais e subantárticos.

Na região da PCSB (figuras 1.6 e 1.7) ocorre o encontro de massas de águas de origem tropical, subantártica e de aporte continental, que, através de suas distintas características, tornam a região dinâmica e com grande contraste termohalino. Sua circulação é influenciada principalmente pelas águas da pluma do Rio da Prata, pelos ventos e pela intensidade das correntes de contorno oeste que fluem pela quebra de plataforma Piola et al. (2008), onde existe uma grande variação dos parâmetros físicos devido a sazonalidade.

A alta variabilidade sazonal e interanual, no campo de vento (Piola et al., 2005; Braga and Krusche, 2000), condiciona a ocorrência de ventos de Nordeste (NE) dominantes no verão, que forçam o deslocamento das águas costeiras em direção ao Sul, e ventos de Sudoeste (SO) no inverno, que induzem seu deslocamento em direção ao Norte (Möller et al., 2008; Marques, 2009; Marques et al., 2010a,b, 2012) . Estas situações podem ser influenciadas de acordo com a intensidade do índice de Oscilação Sul (Piola et al., 2005).

Durante o inverno, a PCSB é dominada por águas de origem subantártica, sendo advectada para norte por uma corrente costeira presente apenas neste período. No entanto,

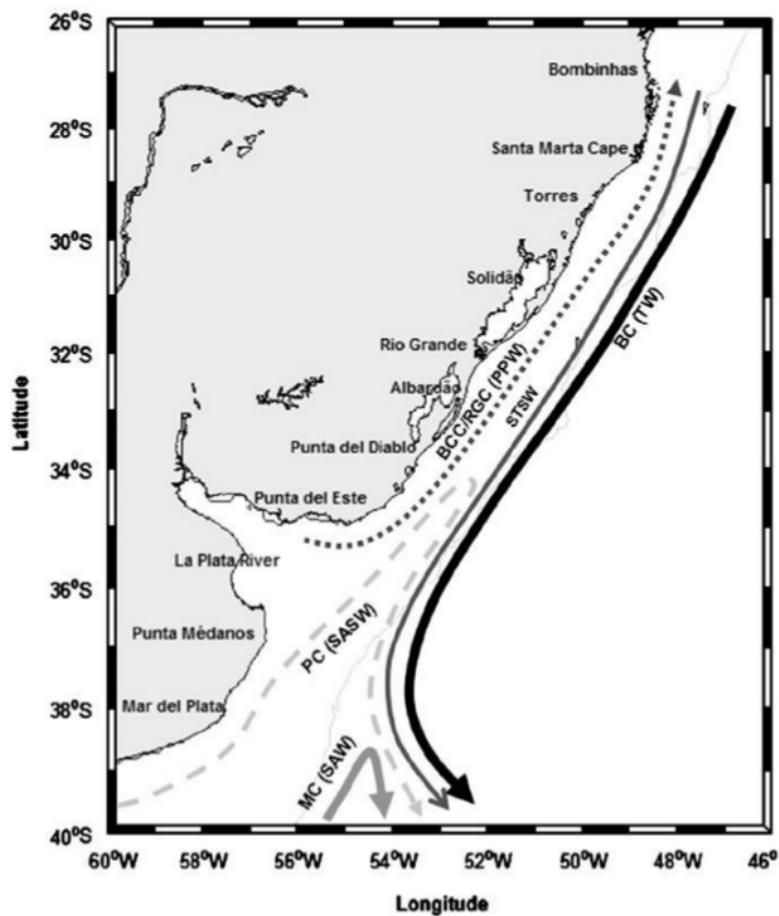


Figura 1.6: Correntes marinhas superficiais e massas de água no inverno. BC: Corrente do Brasil; MC: Corrente das Malvinas; PC: Corrente da Patagônia; BCC/RGC: Corrente Costeira do Brasil ou Corrente do Rio Grande; TW: Água Tropical; SAW: Água Subantártica; SASW: Água Subantártica de Plataforma; PPW: Água da Pluma do Rio da Prata; STSW: Água Subtropical de Plataforma. Fonte: Möller et al. (2008).

no verão, a região é fortemente influenciada por massas de águas de origem tropical, transportadas para o sul pela Corrente do Brasil. Além da influência de águas de origem oceânica, a região recebe águas de origem continental como do estuário do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos (Castro et al., 2006). No inverno a região superficial mais próxima a costa é ocupada principalmente pela Pluma do Rio da Prata (plataforma interna Fig. 1.6 e Fig. 1.7), de forma que, até aproximadamente 100 km de distância estas águas se

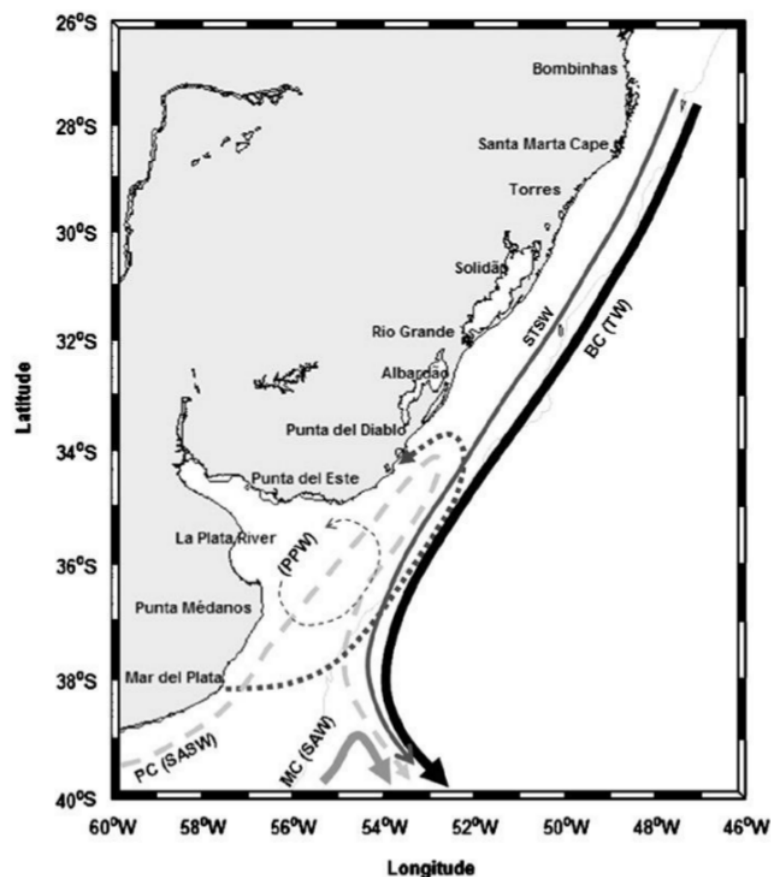


Figura 1.7: *Correntes marinhas superficiais e massas de água no verão. Fonte: Möller et al. (2008).*

apresentam verticalmente homogêneas, tanto em temperatura como em salinidade.

No período que se estende de meados da primavera ao verão, a Pluma do Rio da Prata sofre uma retração em direção sul, e um espalhamento em direção a mar aberto (Möller et al., 2008; Guerrero et al., 1997), isso ocorre devido à maior incidência de ventos de NE (Möller et al., 2008), e ao transporte de Ekman gerado a partir do cisalhamento deste vento com a superfície do mar. A variação latitudinal da pluma tem influência sobre as demais massas de água presentes na região, seja permitindo que as mesmas ocupem a plataforma ou impedindo que este avanço ocorra (Aseff, 2009).

Durante o verão, grande parte da plataforma continental fica sob a influência da Água Subtropical de Plataforma e da Água Central do Atlântico Sul, com presença também da Água Tropical em regiões mais ao largo da costa (Möller et al., 2008). Deste modo, o gradiente de temperatura superficial entre a PCSB norte e sul não passa de 10 °C. Nesta estação, a Pluma do Rio da Prata ($S < 33.5$) fica restrita a área ao sul de Rio Grande (32 °S), alcançando maiores distâncias da costa (Aseff, 2009), de forma que a estratificação vertical fica diretamente relacionada aos gradientes verticais de temperatura.

Soares 2001 e Aseff 2009 demonstraram que, com exceção do verão, a área ao sul de Rio Grande está sempre sob a influência das águas da Pluma do Rio da Prata, o que traz impactos no campo de correntes desta região. Isto é confirmado através da série de artigos que, tendo por base a distribuição de temperatura e salinidade, indicam a importância do deságue continental do Rio da Prata e do efeito do vento nos processos de circulação ao longo da plataforma interna e média (Piola et al., 2005, 2008; Möller et al., 2008). Como estes fatores apresentam forte variabilidade sazonal e interanual é de se esperar que o mesmo ocorra com o regime de correntes.

A circulação na PCSB é influenciada principalmente por fenômenos meteorológicos e pelas águas da pluma do Rio da Prata (Piola et al., 2008). Segundo Souza 2004 e Moller 2008, as águas da Pluma do Rio da Prata são transportadas para o norte por uma corrente denominada Corrente Costeira do Brasil que flui em sentido contrário ao da Corrente do Brasil (figura 1.6). Enquanto a Corrente do Brasil transporta águas de origem tropical quentes e salinas em direção ao sul, a Corrente Costeira do Brasil transporta águas de baixa salinidade e muito frias em direção ao norte.

Portanto, é possível afirmar que diversos fenômenos com diferentes escalas tempo-

rais são responsáveis pela circulação altamente dinâmica na PCSB, como: circulação gerada pelo gradiente termohalino; a passagem de sistemas atmosféricos frontais que influem nos ventos e na circulação local; penetração de águas frias provenientes do sul e a influência das correntes de contorno oeste. Devido a este intenso e variável padrão de circulação, a PCSB se torna uma região propícia à conversão energética de forma multidirecional.

1.3 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade de utilização de conversores de energia do tipo turbina na Plataforma Continental Sul do Brasil.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Determinar o conversor de energia de correntes do tipo turbina mais apropriado para a região de estudo;
- Avaliar o potencial energético, a partir de correntes marinhas, da região de estudo de forma a identificar regiões ótimas para a conversão de energia;
- Analisar o potencial de conversão de energia em curto e médio prazo através da análise de variabilidade temporal e espacial;
- Investigar a influência das correntes e variação dos fluxos como contribuição para a conversão de energia dentro de sítios de conversão.

1.4 Estrutura da Dissertação

O **Capítulo 1** apresenta a introdução do trabalho, destacando a importância das pesquisas na área de energias renováveis, e a importância da região de estudo, os aspectos hidrodinâmicos e físicos que controlam a dinâmica da região estudada, assim como os objetivos deste trabalho.

O **Capítulo 2** apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, descrevendo em detalhes as características do modelo numérico utilizado, as fontes de dados utilizadas para forçar o modelo, as ferramentas utilizadas na análise dos resultados, bem como o módulo de conversão de energia.

O **Capítulo 3** apresenta os resultados obtidos para a análise do potencial do uso de conversores de energia de correntes. Além destes resultados, simulações de sítios de conversão de energia são abordadas com o intuito de analisar a variabilidade temporal e espacial da conversão energética, além da avaliação dos principais eventos.

O **Capítulo 4** apresenta a discussão dos resultados apresentados no capítulo anterior. O **Capítulo 5** serão apresentadas as conclusões do estudo. No **Capítulo 6**, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros e algumas possibilidades de empregar a metodologia adotada neste trabalho para outros usos, no **Capítulo 7** as referências bibliográficas.

Capítulo 2

Material e Métodos

Este trabalho foi desenvolvido pela utilização de modelagem numérica tridimensional e análise direta dos resultados obtidos através de métodos estatísticos. O sistema de modelagem numérica utilizado foi o TELEMAC ©EDF - *Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement da companhia Electricité de France (EDF)*, através do módulo hidrodinâmico TELEMAC3D. Este módulo é utilizado para o estudo de aspectos relacionados à hidrodinâmica tridimensional de fluxos com superfície livre em rios, estuários, regiões costeiras e/ou oceânicas. O módulo da conversão de energia desenvolvido por Marques et al. (2012) foi utilizado para a análise da conversão da energia das correntes em energia elétrica.

O TELEMAC3D resolve as equações de Navier-Stokes utilizando o método de elementos finitos para a discretização espacial e discretização vertical em coordenadas sigma, de forma a acompanhar os limites superficiais e de fundo (Hervouet and Van Haren, 1996). O Método dos Elementos Finitos é considerado o mais adequado para estudar um sistema composto por diferentes compartimentos, como a porção lagunar,

o estuário, e a região costeira adjacente, pois permite: uma melhor representação dos acentuados gradientes batimétricos, a discretização detalhada da linha de costa, a aplicação de refinamentos diferenciados dentro da grade numérica, e a otimização do tempo computacional.

O sistema TELEMAC possui estrutura modular e estudos pioneiros da hidrodinâmica da Lagoa dos Patos utilizando este sistema de modelagem foram realizados por Fernandes et al. (2001, 2002), que utilizando simulações bidimensionais e tridimensionais, descreveram as principais forçantes da circulação estuarina. Monteiro (2006), estudou as principais forçantes da dinâmica do Saco da Mangueira e recentemente, Marques (2009); Marques et al. (2010a,b, 2012) realizaram uma série de estudos numéricos tridimensionais na região da PCSB, descrevendo a influência das principais forçantes que controlam a formação, o comportamento e o destino final da pluma da Lagoa dos Patos.

Processos morfodinâmicos foram estudados por Marques et al. (2010a) através do acoplamento do módulo hidrodinâmico TELEMAC3D a um módulo de dispersão de sedimentos de fundo. Análises da relação entre as ondas geradas pelo vento e as correntes, bem como, as suas contribuições para os processos morfodinâmicos foram realizado por Silva et al. (2012). Em um estudo preliminar, Marques et al. (2012), analisaram a instalação de conversores de energia de correntes na PCSB, bem como descreveram sua influência nos principais processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos da região.

As equações de conservação de massa e a equação de conservação de momento são provenientes da teoria da dinâmica dos fluidos geofísicos, e representadas em um sistema de coordenadas cartesiano. O TELEMAC3D considera as aproximações hidrostáticas e de Boussinesq para as equações de Navier-Stokes. Desta forma, é possível

calcular a elevação do nível do mar, as componentes das velocidades de corrente e as concentrações dos traçadores em cada ponto do domínio computacional.

2.1 Módulo Hidrodinâmico - TELEMAC3D

O sistema TELEMAC é formado por um conjunto de módulos, em duas e/ou três dimensões, para o estudo de aspectos relacionados à hidrodinâmica, transporte de sedimentos, ondas e qualidade de água das regiões costeiras e oceânicas. O TELEMAC3D é o módulo do sistema TELEMAC que resolve as equações de Navier-Stokes assumindo ou não condições de pressão hidrostática. O modelo considera a evolução da superfície livre como função do tempo, e utiliza equações de advecção-difusão para a simulação de propriedades da água como a salinidade e a temperatura.

Os principais resultados obtidos em cada ponto da malha computacional são a velocidade nas três direções e a concentração de quantidades transportadas, enquanto o principal resultado da malha na camada superficial é a elevação da superfície livre. Este modelo leva em conta a influência de efeitos como:

- Influência da temperatura e salinidade;
- Fricção de fundo;
- Influência da força de Coriolis;
- Influência de condições meteorológicas: precipitação, pressão atmosférica e ventos;
- Consideração de trocas de calor com a atmosfera;

- Fontes e sumidouros de fluido e/ou quantidade de movimento dentro do domínio;
- Modelos de turbulência simplificados ou mais complexos (comprimento de mistura, k-epsilon ou k-omega);
- Zonas secas dentro do domínio, como ilhas;
- Transporte de traçadores e difusão pelas correntes com a criação ou desaparecimento de termos.

2.1.1 Domínio do Modelo

O domínio do modelo abrange a Lagoa dos Patos, seu estuário, e a região costeira adjacente até uma profundidade de aproximadamente 3.700 m (figura 1.5 a.) e se estende entre as latitudes de 29.9 °S e 33.2°S e as longitudes de 52.7°W e 49.6°W.

2.1.2 Geração da Grade de Elementos Finitos

A utilização de grades batimétricas não estruturadas (com elementos triangulares) permite uma boa representação das características batimétricas e morfológicas na grade do modelo numérico. Este tipo de grade otimiza a simulação, permitindo representar com resolução adequada as regiões de morfologia complexa, como por exemplo, a região de conexão entre a Lagoa dos Patos e a zona costeira adjacente.

A qualidade dos resultados calculados pelo modelo está diretamente relacionada aos dados batimétricos utilizados para a geração da grade numérica. Desta forma, para obter a melhor representação possível das características batimétricas da Lagoa dos Patos, seu estuário e a região costeira adjacente, foi necessário combinar dados batimétricos de diferentes fontes.

2.1.3 Estruturação das Malhas Batimétricas

As grades batimétricas produzidas para este trabalho (figura 2.1) foram criadas pela combinação de diferentes conjuntos de dados batimétricos.

- Para a região estuarina, foram utilizados as bases de dados batimétricos extraídos das seguintes cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) por Marques (2009):
 - N°2101: Costa Sul – Porto do Rio Grande;
 - N°2102: Lagoa dos Patos – São José do Norte ao Canal da Setia;
 - N°2103: Lagoa dos Patos – Barra do Canal São Gonçalo às Porteiras;
 - N°2106: Lagoa dos Patos – Saco do Rincão e Proximidades;
 - N°2112: Lagoa dos Patos – Rio Grande à ponta da Feitoria.
- A batimetria da Lagoa dos Patos foi representada através dos dados da carta náutica 2140.
- Para a zona costeira, a batimetria foi representada através das seguintes cartas náuticas da DHN (Marques *et al.* 2009):
 - N°D0031: Rio Grande-RS ao Rio da Prata
 - N°D0090: Paranaguá ao Rio da Prata
 - N°D1900: Florianópolis a Torres
 - N°D2000: Torres a Mostardas
 - N°D2200: Mostardas ao Chuí

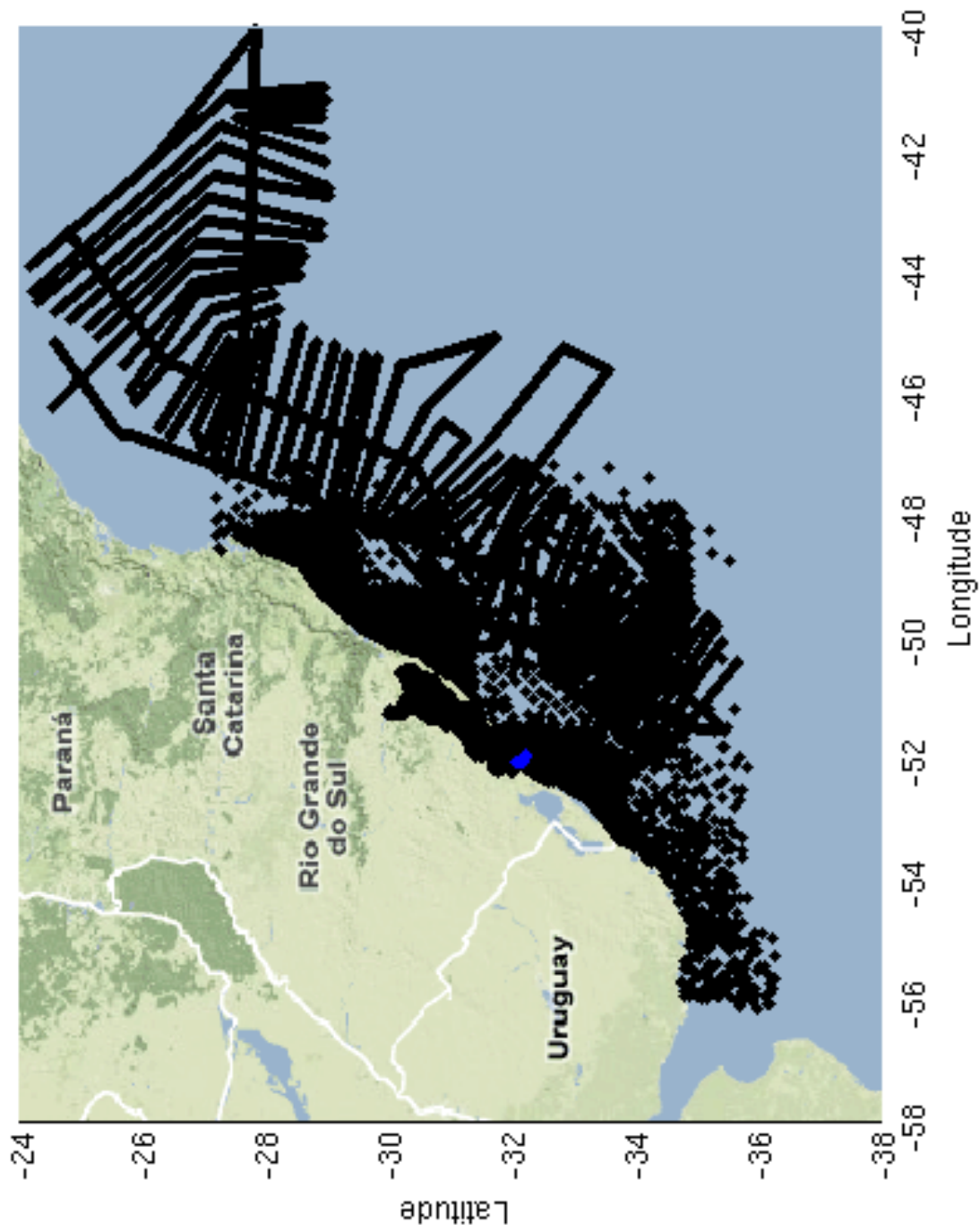


Figura 2.1: Cobertura geográfica dos dados batimétricos utilizados para geração da grade de elementos finitos.

– N^oD2210: Santa Vitória do Palmar ao Chuí

- Os dados das cartas batimétricas na região costeira foram complementados com um levantamento batimétrico realizado pela Marinha do Brasil como parte do projeto Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC).

A nova configuração do Canal de Acesso foi representada na malha do modelo numérico através da inclusão de dados batimétricos obtidos após a conclusão da obra de dragagem e prolongamento dos molhes. Estes dados foram gentilmente cedidos pela Superintendência do Porto de Rio Grande (SUPRG) e pela empresa *Jan de Nul*, que executou o projeto (Figura 2.2).

2.1.4 Discretização vertical da malha

A discretização espacial utilizada está baseada no método de elementos finitos, utilizando prismas com seis nós de forma que os lados quadrangulares são verticais. Sua projeção horizontal bidimensional constitui de elementos finitos triangulares com interpolação linear, de forma que é possível construir uma malha tridimensional duplicando os triângulos no domínio Ω quantas vezes se fizer necessário (figura 2.3). Neste sentido o cálculo em duas e/ou três dimensões é possível utilizando a mesma malha.

Para construir o domínio prismático tridimensional, basta realizar a repetição do domínio bi-dimensional ao longo da vertical em camadas superpostas (planos). Estes planos têm elevações variáveis e a condição necessária é que a elevação dos pontos pertencentes à vertical deve aumentar do fundo para a superfície.

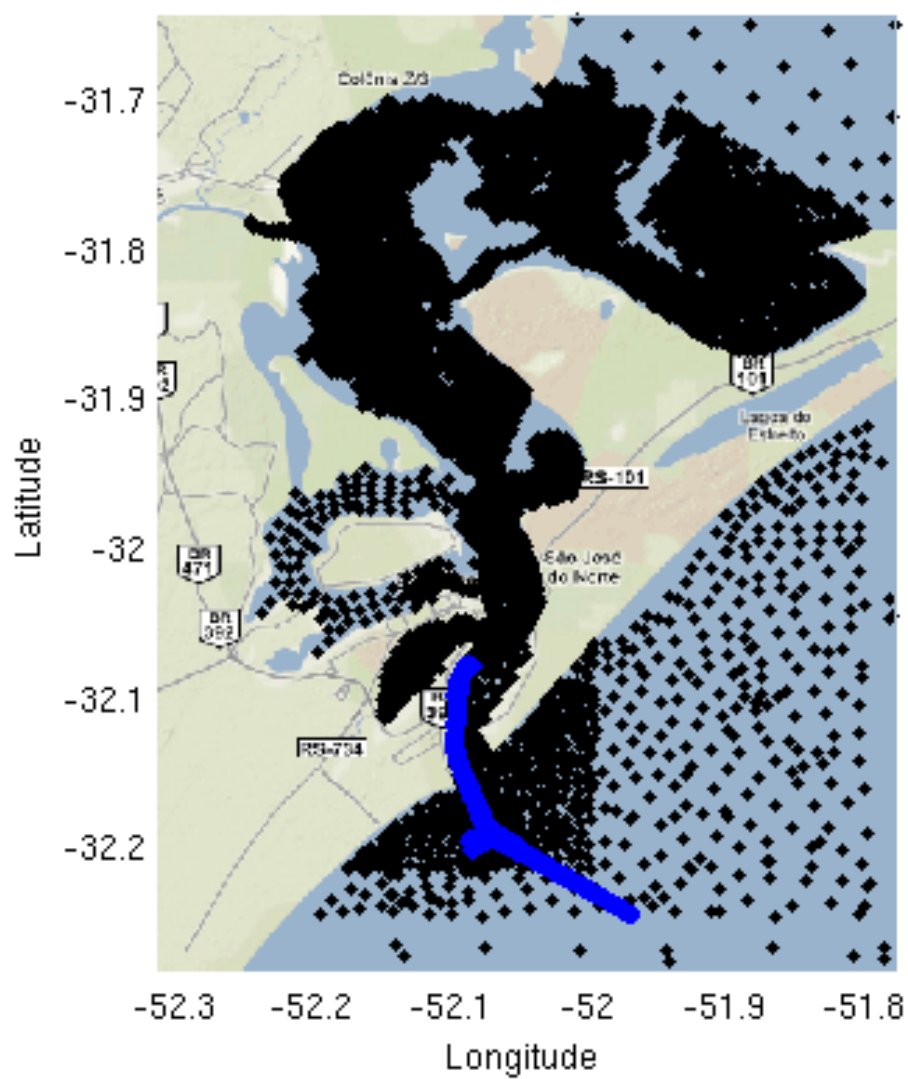


Figura 2.2: Detalhe em azul a localização dos dados batimétricos Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande coletados pela empresa Jan de Nul após a dragagem no ano de 2010

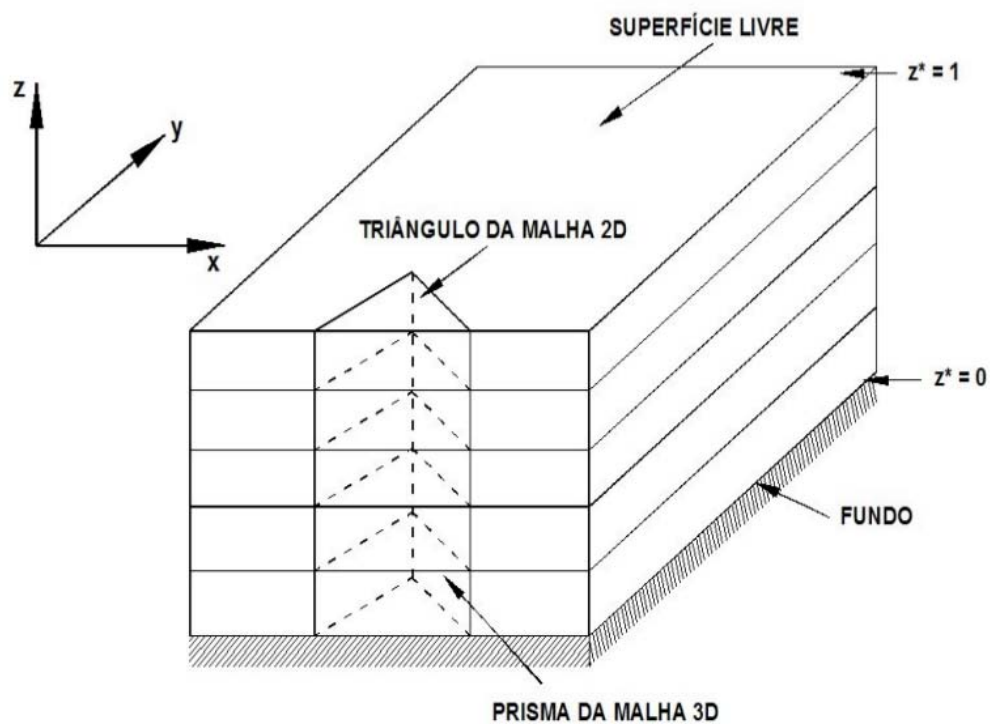


Figura 2.3: *Malha tri-dimensional obtida pela superposição da malha bi-dimensional de elementos triangulares (modificado de Hervouet and Van Haren (1996)).*

Transformação sigma

A superfície livre do modelo evolui com o tempo de forma que as elevações z da malha 3D variam de um passo de tempo para outro. As variáveis f^{n+1} , f_D , f_c e f^n ($f = u, v$ ou T) são definidas em diferentes malhas. Contudo é possível executar a mudança das variáveis, tanto como fixar a malha durante um passo de tempo. A mudança das variáveis adotada neste trabalho foi a de transformação sigma, a qual consiste em passar de um sistema de coordenadas vertical z para um sistema z^* independente do tempo.

A transformação sigma clássica utilizada neste trabalho é representada pela relação:

$$z^* = \frac{z - z_f}{z_s - z_f} \quad (2.1)$$

Onde: z_f representa a profundidade local medida na malha e z_s a elevação da superfície livre. Esta transformação é realizada nas equações do movimento e de concentração de traçadores para que seja feita a troca de um sistema de coordenadas (x, y, z) para o sistema de coordenadas (x, y, σ) , que permite acompanhar os limites superficiais e de fundo. Neste trabalho foram utilizados 15 níveis sigma em todas as simulações, sendo que estes níveis foram distribuídos de forma a fornecer uma melhor resolução das camadas superficiais e de fundo. A figura 2.4 mostra uma visão esquemática da distribuição de 5 níveis sigma ao longo de uma seção transversal de uma malha de altura variante de 0.4m a -0.2m.

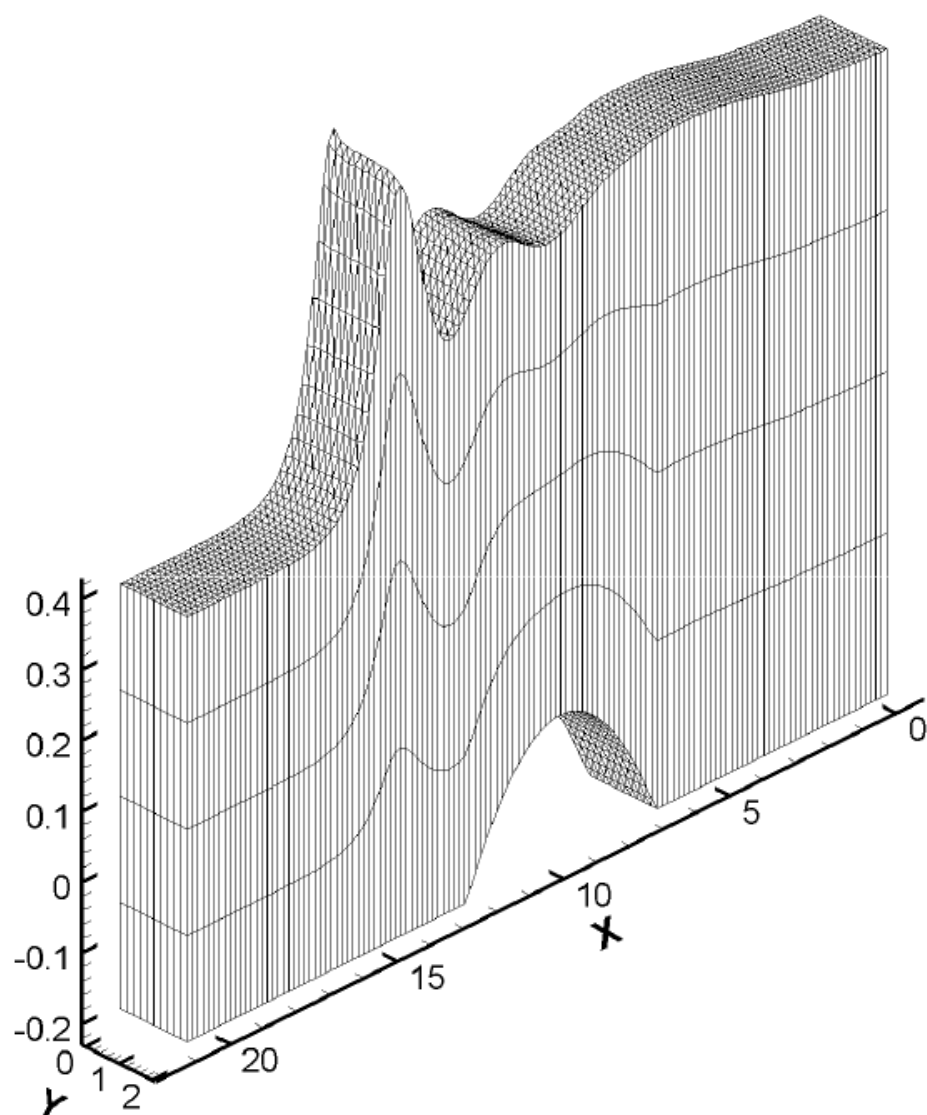


Figura 2.4: Representação tridimensional dos níveis sigma da malha numérica.

2.1.5 Equacionamento do modelo

As equações de conservação de massa (equação da continuidade) e a equação de conservação de quantidade de movimento são derivadas das relações da dinâmica dos fluidos geofísicos, e representadas em um sistema de coordenadas cartesiano. No módulo tridimensional, o modelo TELEMAC3D considera as aproximações hidrostáticas e a de Boussinesq para as equações de Navier-Stokes.

A aproximação hidrostática considera a simplificação dos termos da velocidade vertical w que possuem pequenas escalas, desprezando assim a difusão, os termos fonte e a aceleração na vertical. Portanto, os termos que consideram as variações de pressão hidrostáticas e gravidade são mantidos na equação vertical de quantidade de movimento, de forma que, a pressão em um ponto depende apenas da pressão atmosférica na superfície e do peso da coluna de água sobre a partícula.

A aproximação de Boussinesq considera que a diferença na densidade ($\Delta\rho$) em relação a um valor de referência (ρ_o) é supostamente pequena. Desta forma, como a equação do estado relaciona a densidade do fluido com a concentração dos traçadores na massa de água, é possível definir a sua influência nas equações hidrodinâmicas.

Neste sentido, é possível criar um conjunto de equações de Navier-Stokes hidrostáticas, que são utilizadas pelo TELEMAC3D para o cálculo da profundidade da água e das componentes da velocidade de corrente em cada ponto do domínio computacional, para cada passo de tempo do modelo.

Considerando que a densidade do fluido é denotada por ρ , a pressão por p e o vetor velocidade (u, v, w) , podemos escrever as equações da continuidade e da quantidade de movimento em coordenadas cartesianas para um fluido incompressível como:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla^2(vu) + F_x \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla^2(vv) + F_y \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nabla^2(vw) + F_z \quad (2.5)$$

Equação da pressão hidrostática:

$$p = \rho_o g(S - z) + \rho_o g \int_z^S \frac{\Delta \rho}{\rho_o} \quad (2.6)$$

Termo fonte das equações do momento

Fricção com o fundo

No fundo, a tensão de cisalhamento atuando no fluido se opõe a velocidade de corrente e pode se descrita como:

$$\vec{\tau} = -\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} \quad (2.7)$$

O conhecimento desta tensão é possível a partir do conhecimento do comportamento do fluxo. Modelos de turbulência podem fornecer esta estimativa, baseado no conhecimento da velocidade de corrente próximo ao fundo. Através de uma análise dimensional, obtemos a seguinte equação para representar a tensão de cisalhamento como:

$$\vec{\tau} = -\frac{1}{2}\rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} \vec{u} \quad (2.8)$$

Onde, as unidades são dadas em $kgm^{-1}s^{-2}$, em que C_f é um coeficiente de fricção adimensional. Por definição, esta equação, a qual serve para a determinação da tensão de cisalhamento, é baseada na hipótese de que essa tensão é obtida longe o suficiente da barreira sólida. Desta forma, juntando as equações anteriores, obtemos:

$$v \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} = -\frac{1}{2}\rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} \vec{u} \quad (2.9)$$

A tensão $v \frac{\partial \vec{u}}{\partial n}$ é obtida na formulação variacional dos termos de difusão em elementos finitos. Portanto, qualquer modelo de turbulência irá fornecer uma fórmula para a estimativa desta tensão baseada no conhecimento da rugosidade do fundo e do fluxo na vizinhança da barreira sólida.

Frequentemente, os modelos de turbulência fornecem a expressão para a velocidade de cisalhamento ou o coeficiente de arrasto. Assim, existe uma série de fórmulas para a estimativa do coeficiente de arrasto que podem ser usadas pelo modelo TELEMAC3D,

dentre elas, a fórmula de Manning, utilizada neste trabalho.

$$C_f = \frac{2gm^2}{h^{1/3}} \quad (2.10)$$

Em que: m é o coeficiente de Manning e h é a profundidade da água.

Influência do vento

A influência dos ventos é considerada no modelo como uma condição bidimensional no contorno superficial. A tensão de cisalhamento gerada pelo vento pode então ser descrita segundo a equação 2.1.5:

$$\nu \frac{\partial \vec{u}_H}{n} = \frac{\rho_{ar}}{\rho} a_{vento} \vec{W} \cdot k \vec{W} \quad (2.11)$$

Assim descrevemos: a densidade do ar $\rho_{ar} = 1,29 kgm^{-3}$, $\vec{u}_H$ como a velocidade na superfície do domínio, $\vec{W}$ sendo a intensidade do vento e $k \vec{W}$ o módulo da mesma. O coeficiente da influência do vento a_{vento} (adimensional) é dado por

Flather (1976) como:

$$a_{vento} = 0.656 \times 10^{-3}$$

se

$$k \vec{W} k \leq 5m/s$$

$$a_{vento} = (-0.12 + 0.137 k \vec{W} k) \times 10^{-3}$$

se

$$5m/s \leq k\vec{W}k \leq 19.22m/s$$

e

$$a_{vento} = 2.513 \times 10^{-3}$$

se

$$k\vec{W}k \geq 19.22m/s$$

É importante ressaltar que a influência do vento é um fenômeno complexo que depende da rugosidade da superfície livre, da intensidade do vento e da distância da qual a observação é feita a partir da superfície.

Força de Coriolis

Esta força é levada em consideração pelo fato de a Terra ser um referencial não inercial. Ela aparece devido ao movimento de rotação da Terra em torno de seu próprio eixo, de forma que, a mesma é somada às equações do movimento em referenciais inerciais. A força de coriolis em uma certa latitude (ϕ) é dada por:

$$F_x = 2\omega v \sin\phi = fv \quad (2.12)$$

$$F_y = -2\omega u \sin\phi = -fu \quad (2.13)$$

Traçadores

Um traçador pode ser definido como uma substância, partícula ou propriedade pre-

sente na água, tal como temperatura, salinidade, sedimentos e nutriente. Esses ainda podem ser considerados ativos, quando há interação com a hidrodinâmica, ou passivo, se não há interação.

A evolução temporal desses traçadores depende dos processos advectivos e difusivos, sendo este primeiro controlado por correntes, e o último por processos turbulentos, além de fontes e sumidouros. A equação do movimento desses traçadores pode ser escrita em três dimensões em sua forma conservativa como:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho T U + q) = F_{\text{fonte}} \quad (2.14)$$

Onde F_{fonte} é a taxa de criação, e q é o fluxo decorrente da difusão molecular ou turbulenta. A equação de advecção e difusão, em sua forma não conservativa, descreve:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \nabla T = \text{div}(v_T \nabla T) + Q \quad (2.15)$$

Em sua forma expandida, esta equação assume:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (2.16)$$

Trocas de calor

A potência térmica liberada para a atmosfera por unidade de área P é proporcional a $T - T_{ar}$, sendo T a temperatura da água na superfície e T_{ar} a temperatura do ar. Desta

forma, definimos através de conceitos termodinâmicos que:

$$P = A(T - T_{ar}) \quad (2.17)$$

Em que, A é o coeficiente de troca de calor em $Wm^{-2} ^\circ C^{-1}$. Portanto, o fluxo de calor pode ser escrito por:

$$\phi = -\rho C_p \partial_T \vec{\nabla} \cdot \vec{n} = -\rho C_p \partial_T \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.18)$$

Considerando o coeficiente de difusão de calor na água $C_p = 4.18 K g^{-1} ^\circ C^{-1}$. Pelo agrupamento das duas equações podemos obter as equações das condições de contorno:

$$v_T \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{A}{\rho C_p} (T - T_{ar}) \quad (2.19)$$

O coeficiente A inclui fenômenos como a radiação, convecção do ar em contato com a água e o calor latente produzido pela evaporação da água. Sweers (1976) expressa o coeficiente A de acordo com a temperatura da água T e a velocidade do vento W (em m/s) medida no ponto, como:

$$A = (4.48 + 0.0049T) + 2021.5b(1 + W)(1.12 + 0.018T + 0.0015T^2) \quad (2.20)$$

O parâmetro b varia de acordo com a localização. Seu valor médio para o Atlântico é de 0.0025, e seu valor máximo é encontrado no Mediterrâneo, alcançando 0.0035.

Termos de flutuabilidade e pressão atmosférica

Os termos do gradiente de pressão atmosférica e os termos de flutuabilidade que aparecem nos termos do gradiente de pressão são integrados com os termos fonte, de forma que, são relativos aos eixos Ox e Oy , origens das equações:

$$-\frac{1}{\rho_o} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial \rho_{atm}}{\partial x} + g \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial Z_s}{\partial x} - g \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_Z^{Z_s} \frac{\Delta\rho}{\rho_o} dz' \right] \quad (2.21)$$

$$-\frac{1}{\rho_o} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial \rho_{atm}}{\partial y} + g \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial Z_s}{\partial y} - g \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_Z^{Z_s} \frac{\Delta\rho}{\rho_o} dz' \right] \quad (2.22)$$

A densidade é expressa em kgm^{-3} e a temperatura T em $^{\circ}C$. A utilização destes traçadores possibilita o cálculo de variações na densidade para os termos de flutuabilidade. O modelo TELEMAC3D considera algumas possibilidades de cálculo de densidade no modelo incorporando os efeitos dos traçadores em conjunto ou separadamente através de equações simplificadas. A densidade da água pode então ser calculada como função da temperatura, salinidade e pressão.

Modelo de turbulência

A modelagem de processos turbulentos é um delicado problema que o TELEMAC consegue resolver através de vários métodos. O método escolhido para este trabalho é o de comprimento de mistura para jatos de flutuabilidade. Este modelo apresenta uma formulação simples e foi exclusivamente desenvolvida para a modelagem de plumas em regiões costeiras de maneira bastante satisfatória. Modificado por Rodi (1984), é capaz de estimar a escala de comprimento da mistura, sendo o comprimento de mistura um ponto proporcional a meia-altura do local.

Para maiores informações sobre o equacionamento do modelo TELEMAC3D e apli-

cações para a região de estudo, consultar Marques (2009) e Hervouet (1996).

2.2 Energia das Correntes Oceânicas e sua Conversão em Energia Elétrica

A energia das correntes oceânicas pode ser transformada em energia elétrica utilizando conversores com tecnologia semelhante à utilizada em conversores eólicos através de um rotor submerso que é forçado a girar pelo fluido que passa ao seu redor. Segundo Khan et al. (2009), estes equipamentos de captação de energia aplicados para corpos d'água podem ser encontrados no formato de sistemas convencionais com a utilização de turbinas e sistemas não convencionais sem a utilização de turbinas. Segundo estes autores, com algumas exceções, cada equipamento foi desenvolvido para aplicação em determinado local, correspondendo às características físicas e espaciais do ambiente a ser implementado.

Atualmente, os únicos empreendimentos de energias renováveis oceânicas bem-sucedidos envolvem a energia das marés, através de grandes represas como a de La Rance na França (Bollmann et al., 2010). Entretanto, a empresa Marine Current Turbines, Ltd (MCT) é uma das únicas empresas que conseguiu instalar um conversor de energia das marés com sucesso, sem se valer do conceito do represamento da água (energia potencial). Localizado na Irlanda do Norte, o conversor SeaGen (Douglas et al., 2008) utiliza duas turbinas axiais gêmeas, e está operando em capacidade total (1.2 MW) desde o ano de 2008 (figura 2.5 a.).

As turbinas tradicionais (turbinas axiais semelhantes a figura 2.5 a.), são semelhantes a um conversor eólico, possuem grande área de interação com o fluido e podem

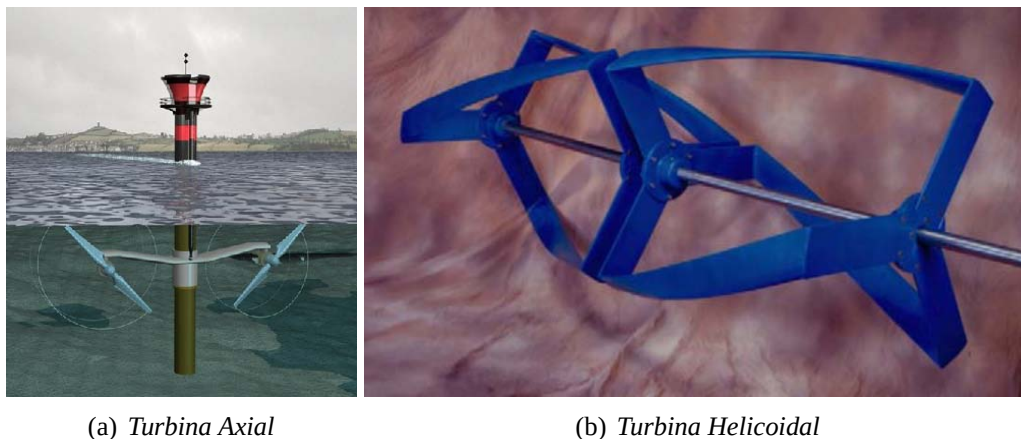


Figura 2.5: *a) Turbina axial desenvolvida pela SeaGen (Adaptado de Douglas et al. (2008)); (b) Turbina Helicoidal (Gorlov, 2010).*

atingir alta capacidade de conversão energética (cerca de 10% superior, de acordo com Douglas et al. (2008)). Entretanto, essa conversão ocorre de forma unidirecional. Neste sentido, foram desenvolvidas turbinas que giram em torno do próprio eixo, independente da direção do fluxo incidente. Seu uso inicial, entretanto, foi apenas aplicado à energia eólica.

A primeira adaptação para fluxos hídricos ocorreu com a invenção da turbina Darrieus, cujas laminas retas e ortogonais eram lisas. Entretanto, duas desvantagens permaneciam: (1) as turbinas não conseguiam se iniciar automaticamente; (2) o ângulo de ataque do fluido poderia causar erros de rotação da turbina. Em vista disso, Gorlov (2001) desenvolveu a turbina helicoidal de fluxo contínuo (figura 2.5 b.), que não possui as desvantagens citadas acima, demonstrando maior efetividade na conversão energética.

As simulações hidrodinâmicas utilizadas neste trabalho foram realizadas com o modelo TELEMAC3D, enquanto as investigações associadas à conversão de energia das correntes em energia elétrica foram realizados com o módulo de conversão de ener-

gia desenvolvido por Marques et al. (2012). Este módulo utiliza a equação padrão de turbinas para o cálculo da potência elétrica convertida em Watts (W) (Gorlov, 2001).

$$P = \frac{1}{2} \eta \rho A v^3 \quad (2.23)$$

A equação de turbina utilizada para conversão de energia das correntes é similar a equação para turbina eólica, portanto uma breve descrição é realizada de forma a apresentar seu funcionamento.

Considerando uma massa de ar em movimento com uma velocidade v , perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário, que representa um conversor eólico, parte da potência disponível nesta massa de ar, que passa pela seção A transversal ao fluxo de ar (figura 2.6 a.), pode ser convertida em energia elétrica.

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador na conversão de energia elétrica (Montezano, 2007). Neste sentido, para levar em conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de eficiência η , que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor, o qual é chamado de Coeficiente de Eficiência da Turbina.

Para determinar o valor máximo desta parcela de energia extraída do vento, o físico alemão Albert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo onde v_1 representa a velocidade do vento na região anterior às pás, v_2 a velocidade do vento no nível das pás e v_3 a velocidade do vento após deixar as pás (Raiambal and Chellamuth, 2002). Desta forma, Betz assumiu um deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma velocidade v_1

que é retardada pelo conjunto de pás, assumindo uma velocidade v_3 a jusante das pás (figura 2.6 b.). Esta teoria é também aplicada as turbinas hidrocinéticas considerando algumas variações que são inerentes ao tipo de fluido no qual as turbinas estão imersas.

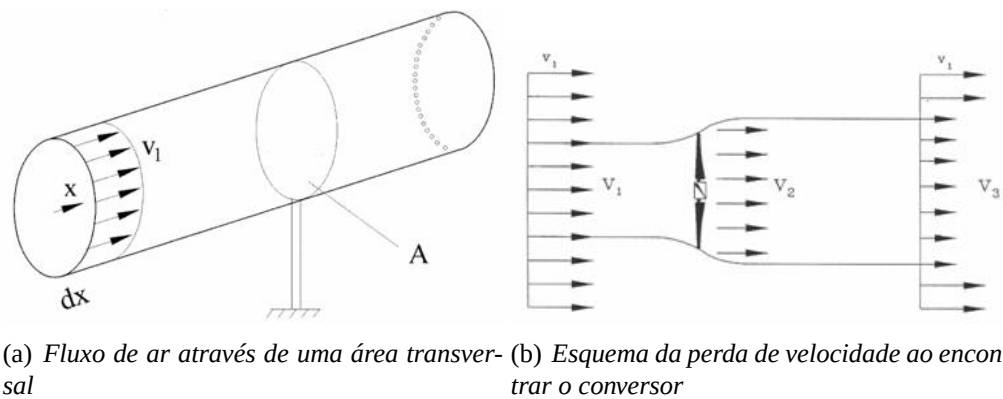


Figura 2.6: (A) Demonstração do modelo de Betz. (B) Fluxo homogêneo encontrando o conversor e sofrendo perda de velocidade constante.

Baseado no princípio da conservação de energia e pela utilização da equação das turbinas adaptadas para a aplicação em ambientes marinhos, os conversores de energia das correntes foram acoplados ao módulo hidrodinâmico TELEMAC3D (figura 2.7). Durante cada passo de tempo do modelo hidrodinâmico (figura 2.7), a velocidade das correntes é calculada e transferida para o módulo de conversão de energia, que converte parte da energia das correntes em energia elétrica através da equação padrão de turbinas (equação 2.23).

No módulo de conversão de energia, a velocidade das correntes é atualizada para manter o balanço de energia do modelo numérico TELEMAC3D. A parametrização utilizada no módulo de conversão de energia pode ser observada na tabela 2.2.

Através da equação 2.23 podemos realizar uma análise da ordem de grandeza de seus parâmetros (Tabela 2.1). Desta forma, podemos concluir que a variável dominante

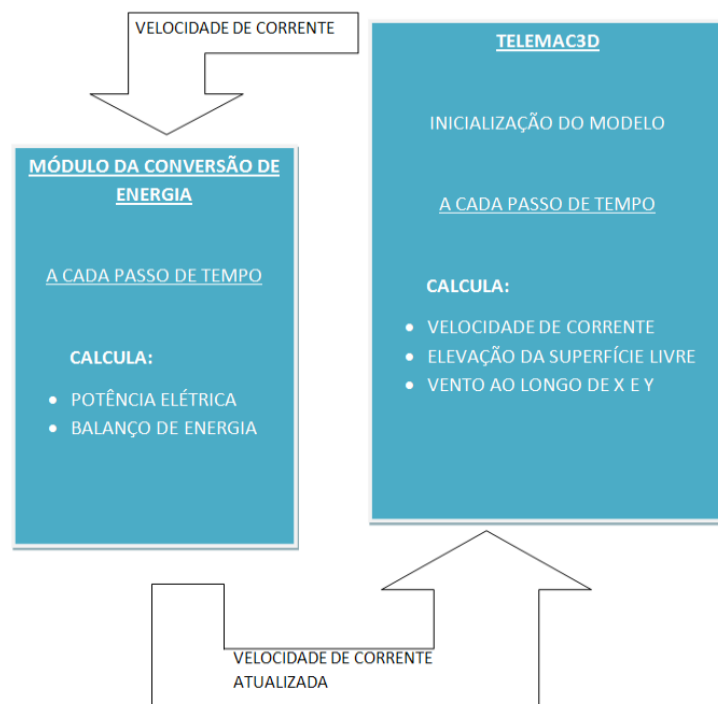


Figura 2.7: Fluxograma da interação entre o modelo TELEMAC3D e o módulo da energia (Adaptado de Marques et al. (2012)).

da equação é a área da turbina, caso seja considerado que a velocidade máxima incidente é em torno de 10^0 . A variação do raio da turbina tem grande influência na quantidade de potência elétrica convertida, pois a área da seção frontal do conversor representa o valor de maior ordem de grandeza nesta equação.

Tabela 2.1: Análise de grandeza para a equação 2.23.

Símbolo e Escala	Descrição	SI
$\frac{1}{2} = o(10^{-1})$	Fração	<i>adimensional</i>
$\eta = o(10^{-1})$	Coeficiente de Eficiência da Turbina	<i>adimensional</i>
$\rho = o(10^3)$	Densidade do Fluido	kg/m^3
$A = o(10^x)$	Área da Seção Frontal do Conversor	m^2
$R = o(10^x)$	Raio da Turbina	m
$v = o(10^0)$	Velocidade da Corrente em módulo	m/s

Uma análise comparativa entre as turbinas axiais e helicoidais foi realizada para determinar o melhor conversor para a área de estudo. A turbina axial corresponde exatamente a equação padrão de turbinas (equação 2.23), pois a área frontal do conversor corresponde à πR^2 , e possui um coeficiente de eficiência da turbina (η) variando entre 0.35 e 0.45 (Rüncos et al. (2005); Marques et al. (2012) e Douglas et al. (2008), respectivamente).

Por outro lado a turbina helicoidal apresenta uma área frontal correspondendo à $h \cdot D$ (figura 2.8) e seu coeficiente de eficiência (η) é igual a 0.35 (Gorlov, 2010). Portanto a equação que controla a potência elétrica de um conversor helicoidal apresenta a forma (equação 2.24). Os parâmetros técnicos das turbinas axiais foram obtidos de Marques et al. (2012) e Douglas et al. (2008), enquanto que os parâmetros da turbina de fluxo contínuo foram obtidos de Gorlov (2001, 2006, 2010). Estes valores são apresentados

Tabela 2.2: Parâmetros técnicos das turbinas.

Parâmetro	Valor		
Referência	Marques 2012	Gorlov 2010	Douglas 2008
Tipo de Turbina	Axial	Helicoidal	Axial
Potência Nominal (KW)	121	121	155
Diâmetro (m)	16	16	16
Altura (m)	—	12.56	—
Área (m ²)	200	200	200
η	0.35	0.35	0.45
Velocidade Inicial (m/s)	0.2	0.2	0.2
Velocidade Nominal (m/s)	1.5	1.5	1.5

na Tabela 2.2.

$$P(W) = \frac{1}{2} \eta \rho (h.D) v^3 \quad (2.24)$$

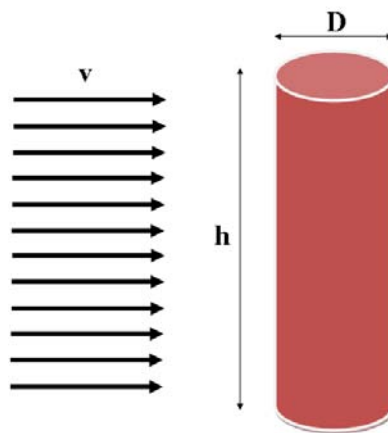


Figura 2.8: Área frontal da turbina helicoidal, corresponde ao formato de um cilindro retangular, os vetores representam a velocidade de corrente incidente no conversor.

Para que a comparação seja realizada de forma adequada, a área dos conversores (A) foi mantida constante (200m²) de acordo com os parâmetros da turbina axial em

funcionamento da SeaGen (Douglas et al., 2008). Os valores da velocidade inicial e nominal estão de acordo com Marques et al. (2012) que estudou a região de estudo. Sendo assim, a curva de potência dos conversores (figura 2.9) demonstra que o conversor axial (Douglas et al., 2008) possui maior potência nominal, gerando maiores valores de energia convertida.

Apesar deste conversor apresentar melhor parametrização e se encontrar atualmente em operação em Strangford Lough, na costa da Irlanda do Norte (Douglas et al., 2008; Fraenkel, 2007; MCT, 2008, 2006), neste trabalho, será utilizado o conversor de Gorlov (2010); Technology (2008); Gorlov (2006, 2001), devido a vantagem de captação energética de forma multi-direcional. Esta turbina é mais apropriada para ambientes com padrão de circulação com alta variabilidade espacial e temporal, ao mesmo tempo, que pode ser mais facilmente implementada sob o ponto de vista numérico.

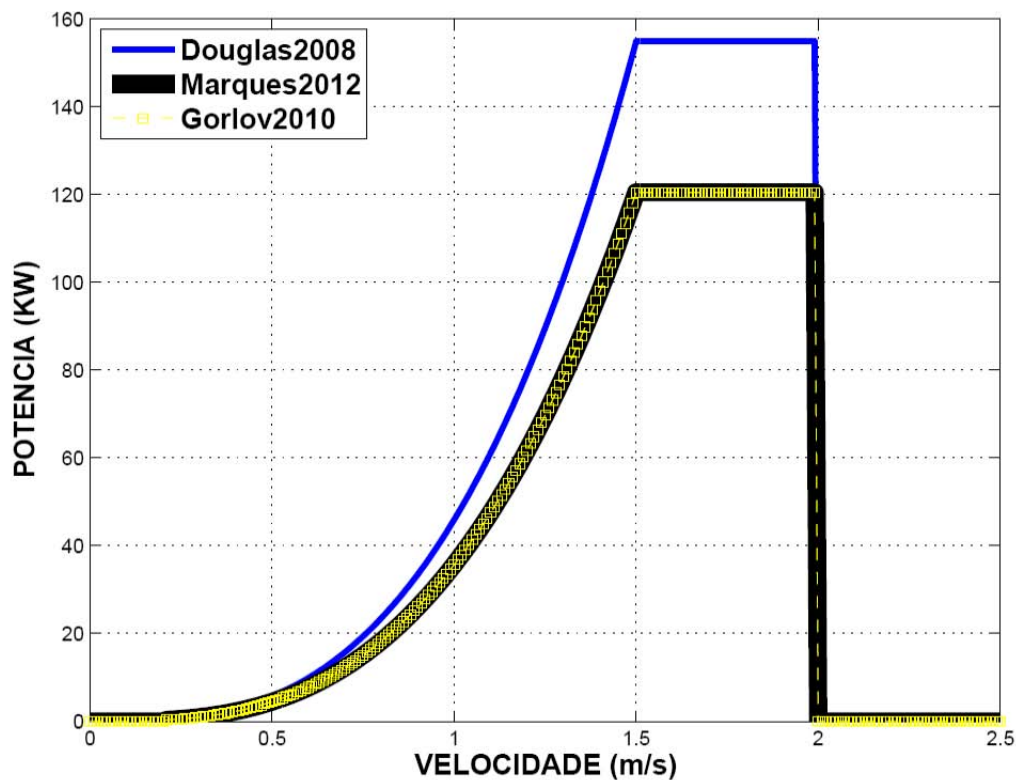


Figura 2.9: Curva de potência dos conversores estudados.

2.3 Sítios de Conversão

Para a realização da análise de conversão de energia, a metodologia de Marques et al. (2012) foi utilizada para dois sítios de conversores localizados nas regiões de maior viabilidade energética que serão abordados posteriormente. Além disso, para a correta determinação das variações de fluxo na região dos conversores, foram realizadas 5 simulações anuais, de acordo com a figura 2.10.

A análise das regiões de estudo sem a interferência dos conversores foi estudada através de uma simulação hidrodinâmica. A malha utilizada para esta análise foi atualizada com as batimetrias atuais da dragagem realizada no ano de 2010 (figura 2.11)

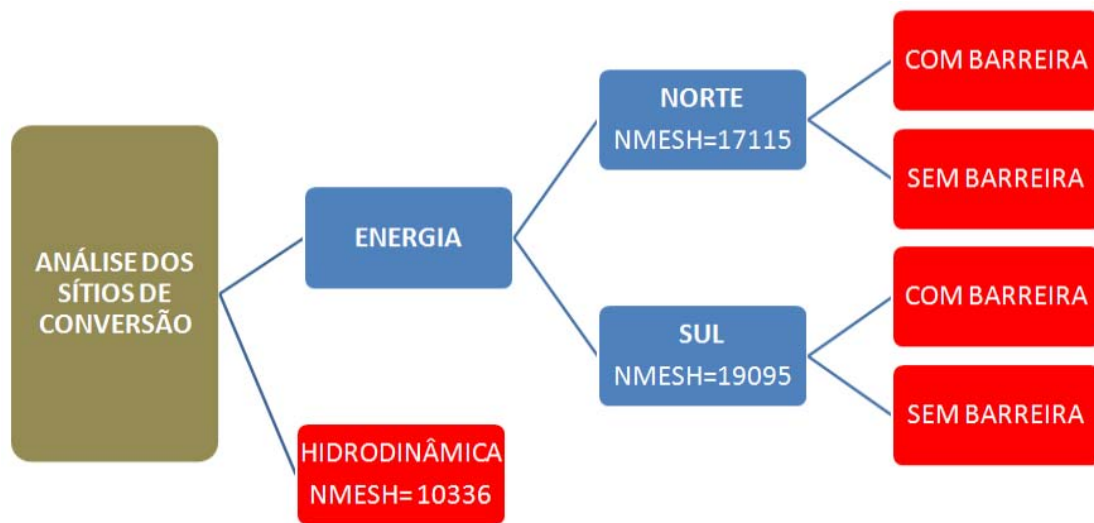


Figura 2.10: *Fluxograma das simulações realizadas para a análise dos sítios de conversão.*

pela Jan De Nul, como descrito na secção 2.1.3. A construção da malha hidrodinâmica no módulo Matisse do sistema TELEMAC, foi finalizada com um total de 10.336 nós (figura 2.11 a.).

A partir desta malha hidrodinâmica (figura 2.11 a.), duas outras malhas foram construídas, sendo uma para a região norte e outra para a região sul, sem alterações no banco de dados batimétricos, de forma que os conversores foram representados como "sumidouros de energia", com ou sem a consideração do efeito de forma. Adotando a malha hidrodinâmica como base, a malha da região norte (ver figura 1.5) foi construída aumentando o número de nós da malha original de 10.336 para 17.115 nós (figura 2.12), enquanto a malha da região sul totalizou 19.095 nós (figura 2.13).

Podemos observar que o sítio de conversores é apresentado em tons de vermelho nas figuras 2.14 e 2.15, por possuírem profundidade igual a zero. Estas malhas representam o estudo de caso "com efeito de forma", onde os conversores são representados por

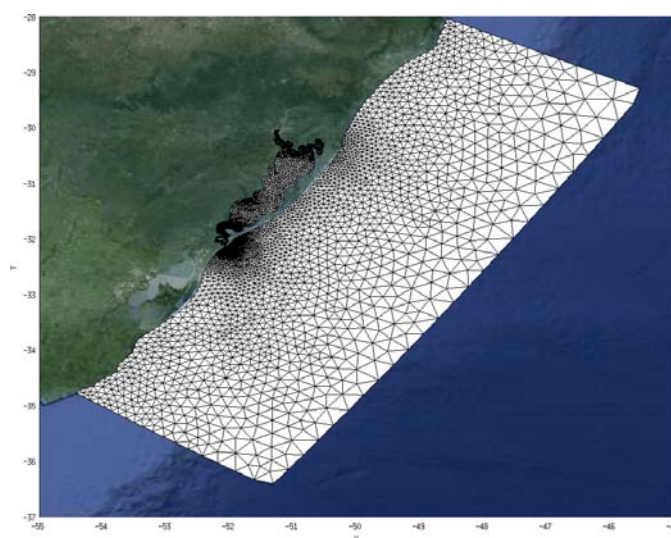
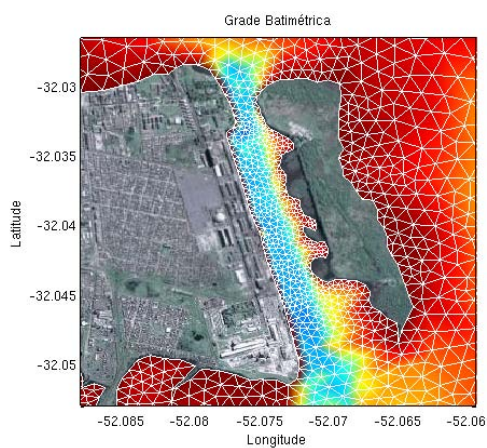
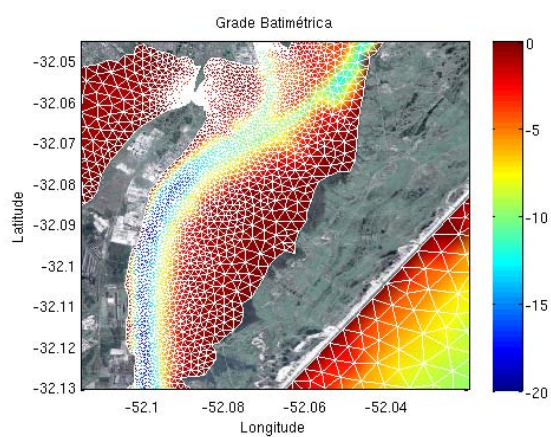
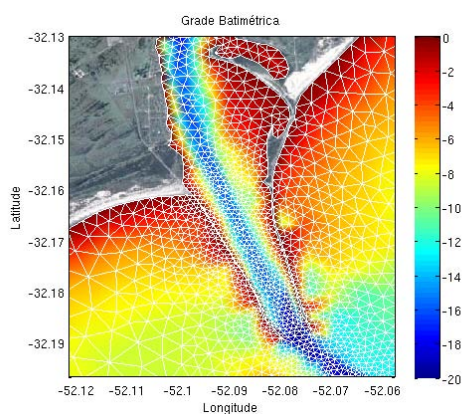
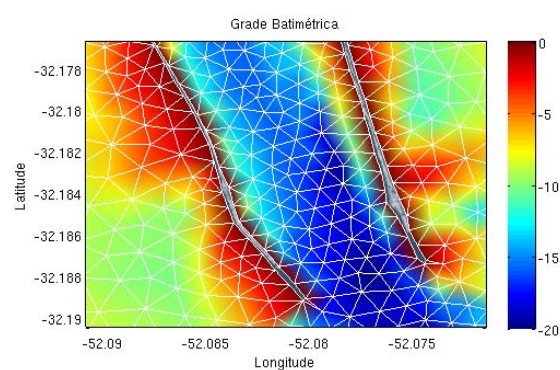
(a) *Malha numérica completa*(b) *Região do Porto Novo*(c) *Região do Canal de Acesso*(d) *Região dos Molhes da Barra*(e) *Entrada dos Molhes da Barra*

Figura 2.11: *Grade batimétrica utilizada para a modelagem hidrodinâmica dos sítios de conversão (a), utilizando a morfologia atual da batimetria do estuário. Em detalhe, as regiões do Porto Novo (b), baixo estuário (c) e a desembocadura dos molhes com a configuração mais recente (d,e). Batimetria dada em metros.*

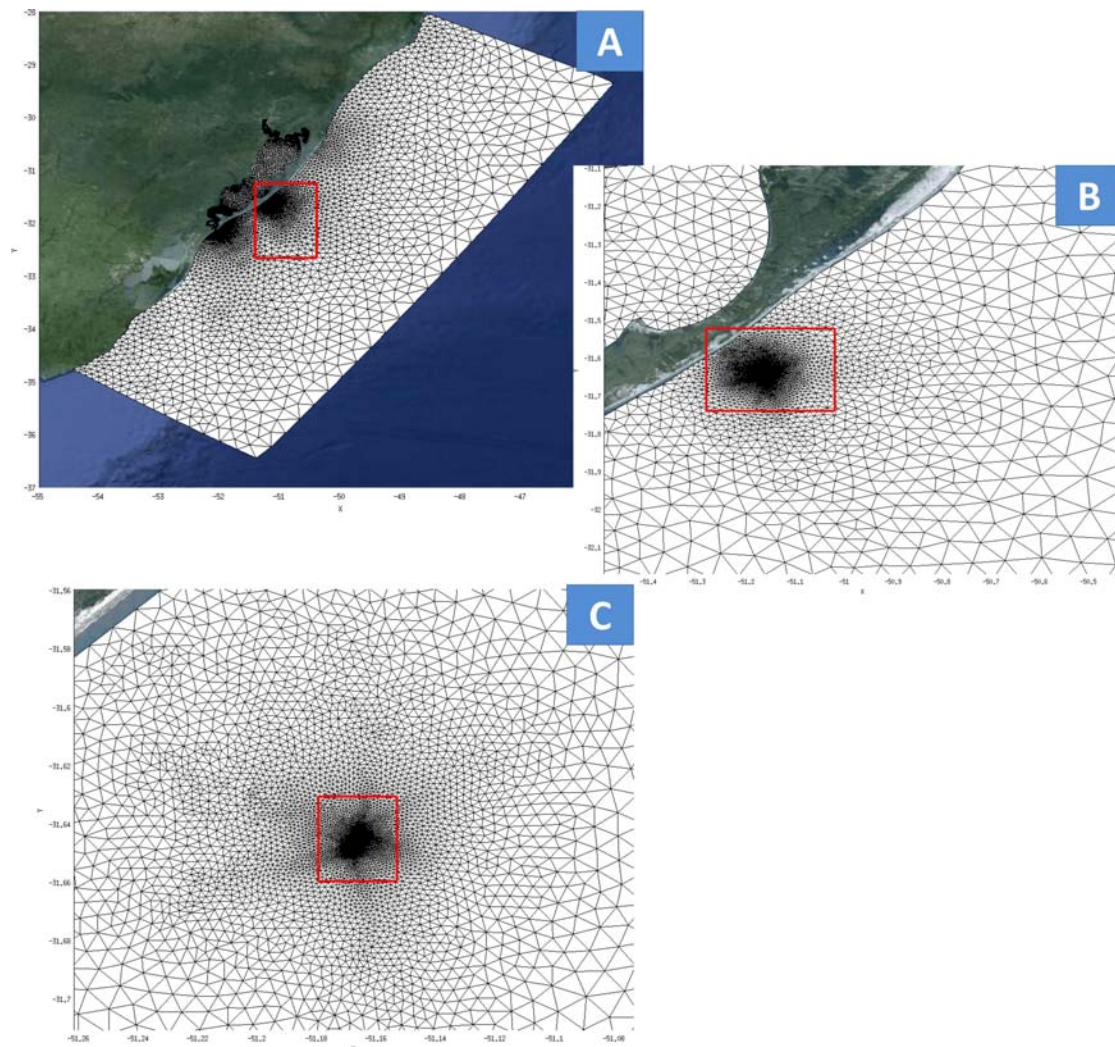


Figura 2.12: *Malha refinada para a região norte, com 17.115 pontos. Destaque para a nuvem de pontos criada na malha hidrodinâmica na região norte (a). Destaque do refino da região (b). Local da instalação dos sítios de simulação, distando aproximadamente 12 Km da costa.*

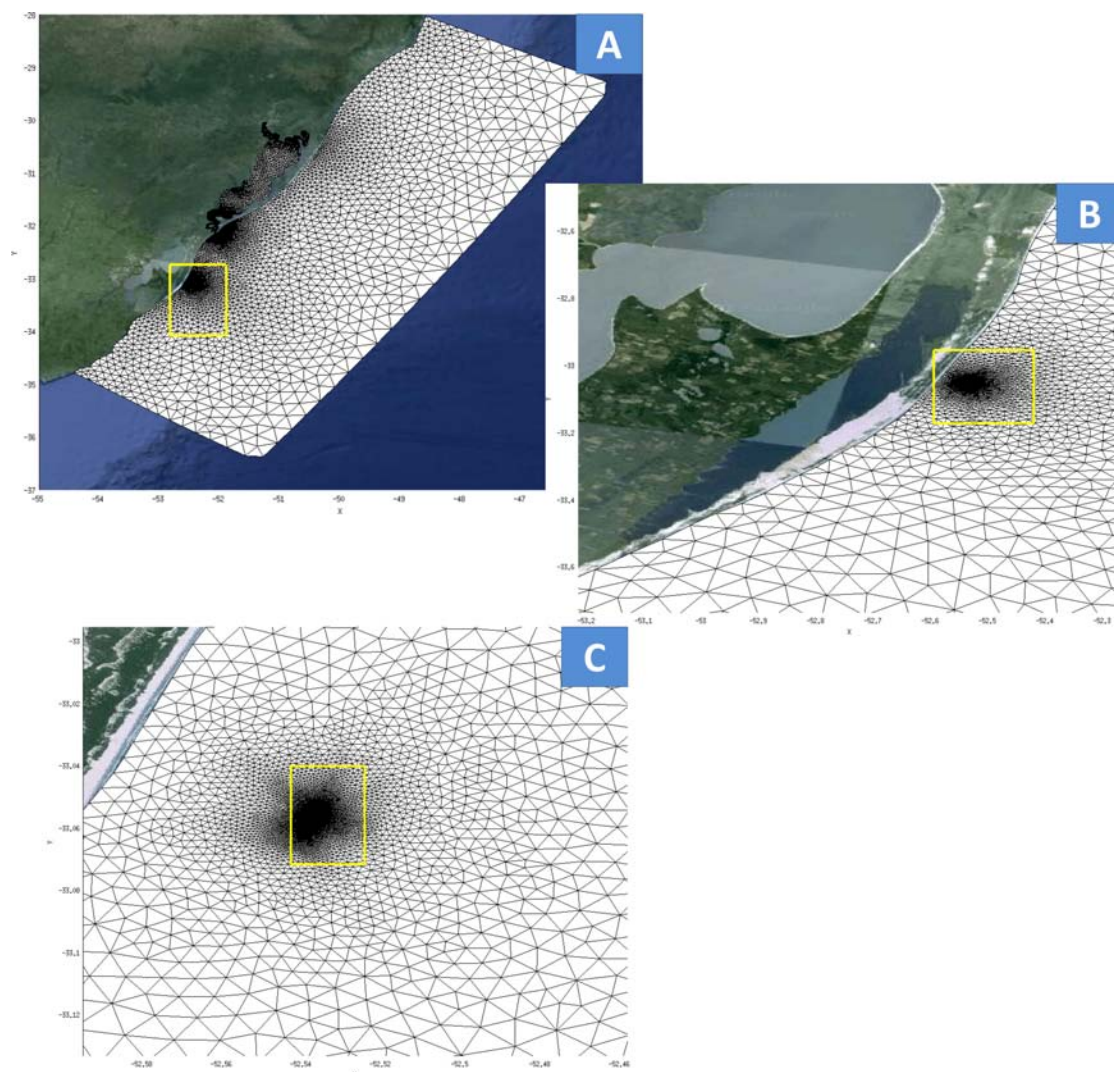


Figura 2.13: *Malha refinada para a região sul, com 19.095 pontos. Destaque para a nuvem de pontos criada na malha hidrodinâmica na região sul (a). Destaque do refino da região (b). Local da instalação dos sítios de simulação, distando aproximadamente 5 Km da costa.*

"postes" ou "ilhas" que atingem a superfície do oceano. Estes cenários serão chamados de cenários **com barreira**. Por outro lado, nas simulações com a ausência da barreira, os conversores foram colocados nas mesmas posições sem a consideração do efeito de forma, representados pelos "postes". Este cenário será denominado posteriormente como cenário **sem barreira**.

Esta aproximação da forma dos conversores como um cone tridimensional (figura 2.16) foi o mais próximo da realidade que se pôde chegar considerando o nível de desenvolvimento atual do módulo de conversão de energia, além das limitações computacionais que são associadas ao aumento do refino numérico. Estas limitações são provenientes do alto número de elementos criado para discretizar o ambiente computacional, acarretando em alto tempo computacional. Nas simulações "sem barreira", foram utilizadas as mesmas malhas, entretanto, a batimetria dos conversores foi alterada dentro do código-fonte do modelo TELEM3D e desta forma, não foi necessária a criação de novas malhas numéricas.

A orientação dos sítios de conversão foi definida como paralela a linha de costa, de acordo com o comportamento residual das correntes na região da plataforma continental adjacente. Entretanto, estudos futuros devem ser realizados com os sítios de conversores direcionados de forma ortogonal ou inclinadas com relação à linha de costa, de forma a otimizar a conversão de energia, distribuindo as linhas de corrente por todo o sítio de conversores intensificando a conversão de energia.

Os conversores distam entre si 200 m em todas as direções (figura 2.16), de forma a obedecer à distância adequada para minimizar o "efeito esteira", decorrente da turbulência gerada pela estrutura (Myers and Bahaj, 2005). Esta distância varia de acordo com a velocidade do fluxo incidente, pois de acordo com Myers and Bahaj (2005), o efeito

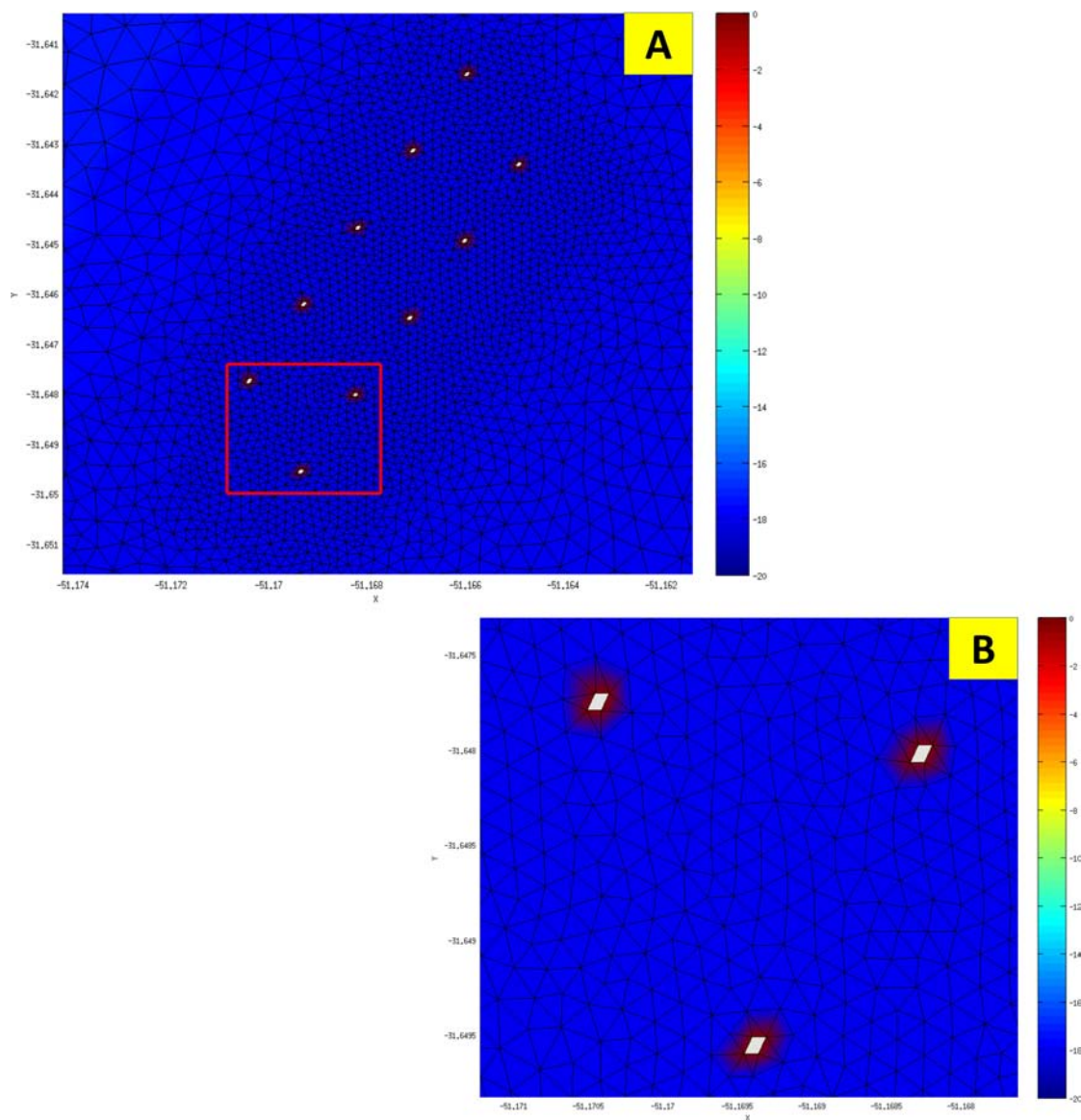


Figura 2.14: Região dos conversores na região norte, composto por 10 turbinas e distando 200m entre si. Em destaque os três conversores da parte inferior (b). Profundidade do sítio é em torno de -18m

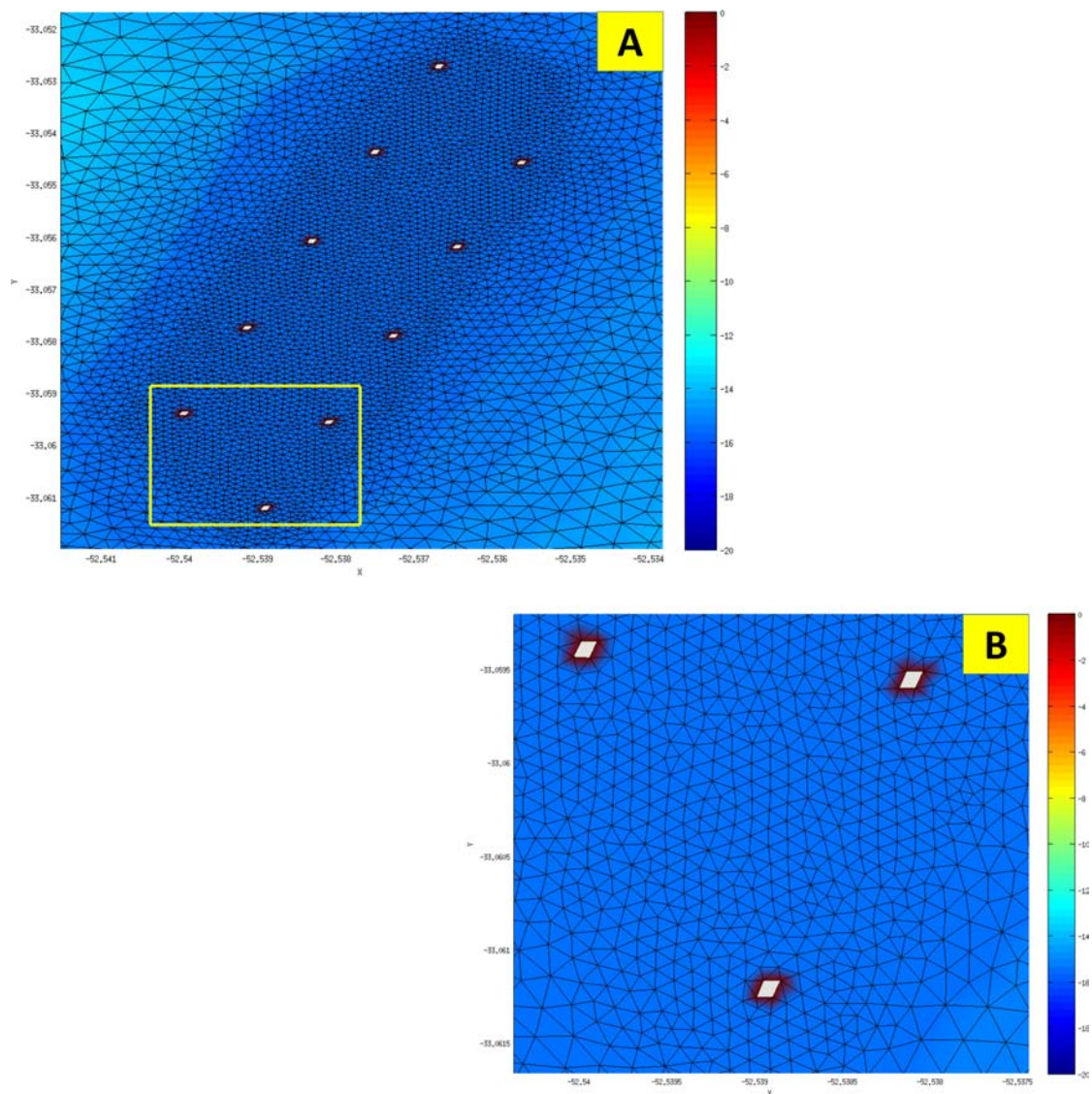


Figura 2.15: Região dos conversores na região sul, composto por 10 turbinas e distando 200m entre si. Em destaque os três conversores da parte inferior (b). Profundidade do sítio em torno de -15.5m

turbulento lateral pode alcançar até 3 diâmetros de distância do conversor, enquanto que a turbulência frontal pode variar de 6 a 10 vezes o diâmetros do rotor (Giles et al., 2011).

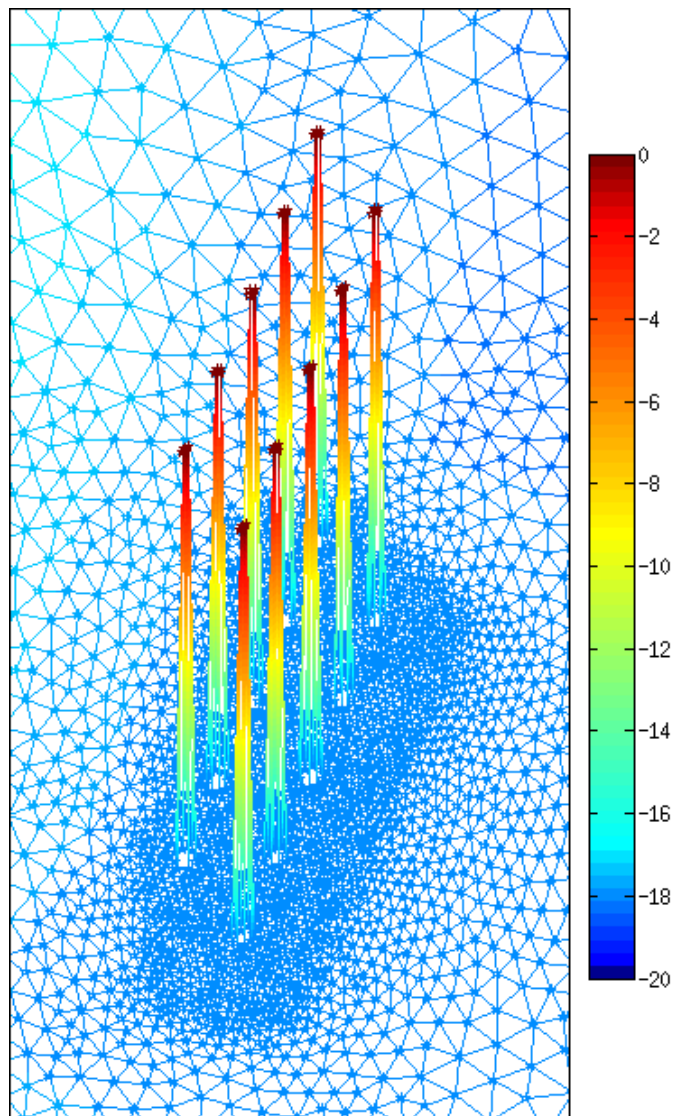


Figura 2.16: *Sítio de conversão de energia com a malha tridimensional utilizada nas simulações da região norte (a). Esta representação demonstra o efeito físico da barreira imposta nas simulações. Profundidade dada em metros.*

Para a definição do tamanho adequado dos conversores helicoidais, e também afim de manter o parâmetro comparativo entre os dois sítios, a potência nominal dos 10

conversores foi aproximada da seguinte forma: de acordo com Li and Calisal (2010), a relação entre a altura e o raio (H/R) do gerador (considerados na equação 2.24), gera influências no coeficiente de eficiência da turbina, onde valores altos da relação H/R podem gerar altos valores do coeficiente de eficiência da turbina (de acordo com a figura 2.17).

Apesar dos locais estudados possuírem diferentes profundidades, os conversores não poderiam apresentar a altura proporcional a profundidade, pois teriam coeficientes de potência da turbina diferentes. Desta forma, utilizando a relação de Li and Calisal (2010), foi obtido o mesmo coeficiente de eficiência de Gorlov (2010) ($\eta = 0,35$), através de uma relação $H/R \simeq 1.4$ (figura 2.17). Sendo assim, foi adotado para ambas as regiões de estudo $H=14\text{m}$ e $R=10\text{m}$, sendo cada conversor capaz de fornecer 170 KW de potência nominal (Tabela 2.3).

Tabela 2.3: Parâmetros utilizados no sítios de conversão.

Velocidade de início de movimento	0.2 m/s
Velocidade nominal	1.5 m/s
Potência nominal	170 KW
Altura do conversor	14 m
Raio do conversor	10 m
Coeficiente de eficiência da turbina (η)	0.35
Densidade (ρ)	1025

A tabela 2.3 foi construída a partir da equação 2.24, através da substituição (equação 2.26) dos valores temos o resultado (equação 2.27):

$$P(W) = \frac{1}{2} \eta \rho (h.D) v^3 \quad (2.25)$$

$$P(W) = \frac{1}{2} * 0.35 * 1025 * [14 \times (10 * 2)] * (1.5)^3 \quad (2.26)$$

$$P(W) = 169.510W \simeq 170KW \quad (2.27)$$

Sendo assim, o desenho final dos sítios de conversão pode ser observado nas figuras 2.14 e 2.15. Outros efeitos físicos como cavitação, presença de difusor, turbulência entre as pás, aquecimento do gerador, lâminas de diferentes formatos, ruídos, entre outros, não foram considerados e devem posteriormente ser incluídos no módulo de conversão de energia.

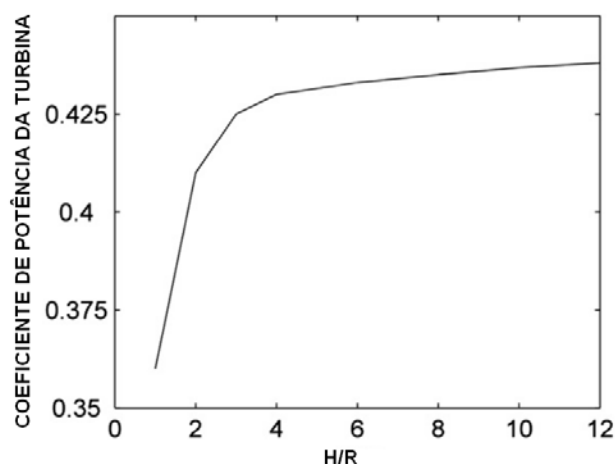


Figura 2.17: *Relação entre H/R e o coeficiente de eficiência da turbina (Adaptado de Li and Calisal (2010)).*

O módulo de conversão de energia de Marques et al. (2012) foi atualizado para o estudo dos sítios de conversão (figura 2.18), onde cada aresta do conversor (em amarelo) representa um ponto do sorvedouro de energia, onde a equação da turbina irá atualizar a velocidade resultante inferior a velocidade incidente, que é retirada nos pontos em vermelho. Cada ponto do conversor possui uma velocidade incidente, a qual resultará

em um valor de potência gerada, em Watts. Os conversores em amarelo também são representados como pontos de contorno sólido, ou seja, o fluxo incidente não atravessa o conversor, apenas é reduzido e re-calculado.

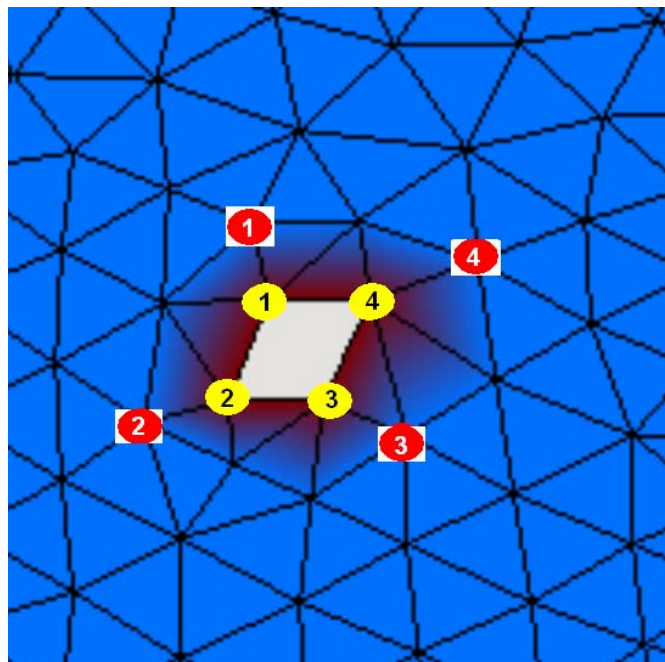


Figura 2.18: *Demonstração da relação entre a velocidade incidente (vermelho) e o conversor (amarelo) no módulo de conversão de energia.*

2.4 Período simulado

O período das simulações escolhido para definir a viabilidade e a sazonalidade de conversão de energia foi de **1° de janeiro de 1998 a 31 de dezembro de 1999** (730 dias de simulação), permitindo representar o padrão de sazonalidade dos parâmetros físicos e da dinâmica da PCSB. O ano de 1998 apresenta uma situação anômala em função do fenômeno El Niño - Oscilação Sul, com anomalias positivas de descarga fluvial ocorrendo ao longo de todo o período, enquanto o ano de 1999, apresenta um padrão de descarga próximo do normal.

Para as simulações dos sítios de conversão, foi utilizada uma abordagem diferenciada, ao adotar condições de contorno climatológicas para as simulações com duração de 1 ano. Desta forma, os períodos e as condições médias mais prováveis para altos eventos de conversão energética poderiam ser analisados.

2.5 Condições iniciais e de contorno - simulações numéricas para análise de potencial energético

Além de condições iniciais pré-definidas através do uso de parâmetros e campos de propriedades, o modelo numérico necessita de condições de contorno para realizar o cálculo das variáveis. O modelo TELEMAC3D considera dois tipos de condição de contorno (Figura 2.19). A primeira são os contornos líquidos, onde podem ser prescritas oscilações, fontes de quantidade de movimento ou de descarga fluvial (como por exemplo, a desembocadura de rios ou as fronteiras oceânicas).

Os contornos líquidos utilizados neste trabalho são as fronteiras continentais do Rio Guaíba, do Rio Camaquã e do Canal São Gonçalo, onde são prescritas séries temporais

de descarga fluvial; e a fronteira oceânica, onde é prescrita a maré, os níveis de água em baixa frequência (escala temporal mensal), velocidades de correntes, salinidade e temperatura (Figura 2.20).

O segundo tipo são os contornos superficiais, onde podem ser prescritas ondas de superfície, ventos ou campos de escalares. No contorno superficial deste trabalho foram prescritos dados de vento dinâmico e temperatura do ar de forma a simular as trocas de calor com a atmosfera (Figura 2.20).

Os dados utilizados como condições iniciais e de contorno foram extraídos de diferentes fontes para o domínio do modelo, e depois interpolados e prescritos para cada ponto da malha de elementos finitos.

Na definição das condições iniciais do modelo, foram prescritos campos de salinidade e temperatura obtidos do projeto Ocean Circulation and Climate Advanced Modeling Project¹ (OCCAM), e prescritos de forma tridimensional em todo o domínio. Além disso, foi prescrito em todo domínio uma elevação do nível do mar de 0.5 m, valor aproximado da elevação do nível do mar média na região (Möller Jr. and Castaing, 1999; Möller et al., 2008), e um campo de velocidades iniciais nulas. As séries temporais de descarga prescritas nas fronteiras continentais do rio Guaíba e do rio Camaquã foram extraídas da página da Agência Nacional de Águas² (ANA). Os dados foram obtidos para estações fluviométricas destes rios na forma de medidas diárias, e interpolados linearmente para cada passo de tempo do modelo.

Os dados de descarga do Canal São Gonçalo foram considerados constantes em 760 m³/s durante toda a simulação (Viegas e Franz, 2006), devido à falta de séries temporais

¹<http://www.noc.soton.ac.uk/JRD/OCCAM/EMODS/>

²www.ana.gov.br

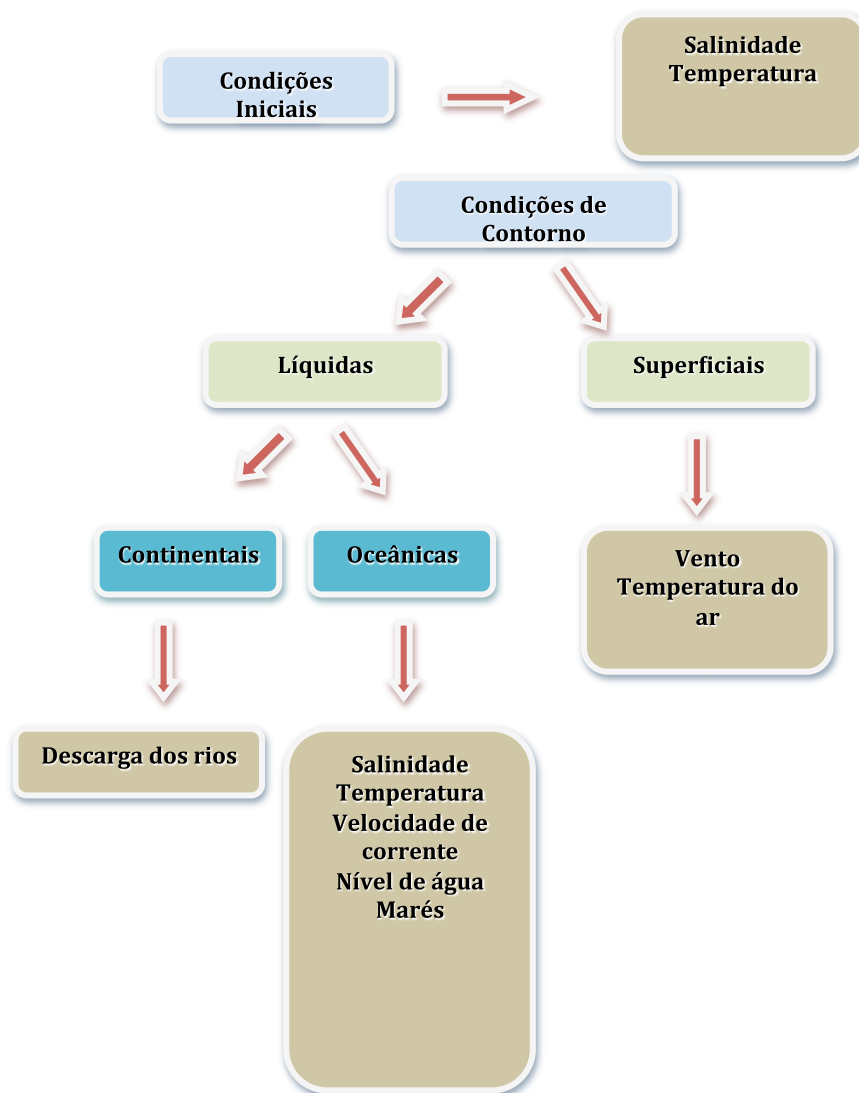


Figura 2.19: Diagrama das condições de contorno do modelo hidrodinâmico TELEMAC3D.

Também foram utilizados nessa fronteira, dados de temperatura do ar junto à superfície do oceano, de forma que os processos de troca de calor com a atmosfera possam ser levados em conta, esses dados foram obtidos da página da NOAA. A forma como todos esses dados são incluídos nos contornos é apresentada na figura 7.

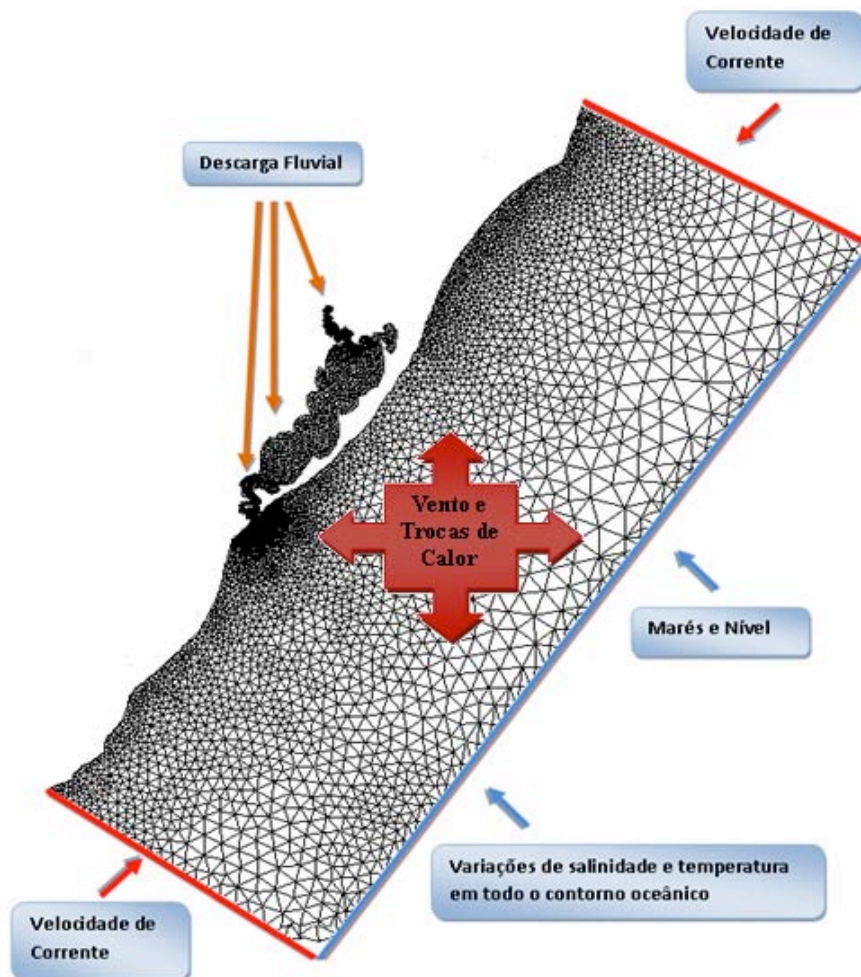


Figura 7: Contornos líquidos e superficiais considerados nas simulações do modelo hidrodinâmico.
 Figura 2.20: *Contornos líquidos e superficiais - simulações numéricas utilizadas para o estudo do potencial energético.*

3.2 O modelo TOMAWAC

O modelo TOMAWAC foi utilizado para avaliar a interação das ondas com a hidrodinâmica. De acordo com Benoit (2003) o modelo é baseado na equação da conservação da densidade de ação da onda, podendo ser utilizado na sua forma estacionária e não-estacionária. Neste trabalho, somente o modo não-estacionário foi utilizado. Este modo consiste em decompor o espectro direcional das ondas em um número finito de frequências e

de descarga deste corpo hídrico.

Na fronteira oceânica do domínio, foram prescritos dados de amplitude e fase das cinco principais componentes de maré da região (K1, M2, N2, O1 e S2), calculadas pelo Grenoble Model FES95.2 (Finite Element Solution – v.95.6). O sinal de maré foi representado como uma soma de funções cossenoidais calculadas para cada ponto da fronteira oceânica, em cada passo de tempo da simulação numérica.

Além disso, a fim de adicionar a influência da circulação dirigida por gradientes de densidade ao longo da plataforma continental do Sul do Brasil, os contornos oceânicos transversais à região costeira foram forçados com variações de velocidade de corrente, e todos os contornos oceânicos foram forçados com variações de salinidade e temperatura. Estes dados foram obtidos através do projeto OCCAM e prescritos ao longo de todos os contornos oceânicos do modelo numérico.

No contorno superficial, as variações espaço-temporais do vento foram representadas através de dados da página do National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) ³, interpolados e aplicados a cada nó do domínio do modelo numérico. De forma complementar, os dados de temperatura do ar junto à superfície do oceano foram obtidos da página da NOAA, e forçados de forma similar aos ventos, possibilitando que os processos de troca de calor com a atmosfera fossem levados em consideração no modelo.

³<http://www.cdc.noaa.gov/data/reanalysis/reanalysis.shtml>

2.5.1 Condições iniciais e de contorno climatológicas - simulações numéricas dos sítios de conversão de energia

Para a geração dos dados climatológicos, foram utilizados os mesmos bancos de dados citados anteriormente (ANA, OCCAM, Reanalysis). Foram considerados bancos de dados com longa duração, de forma a considerar os principais ciclos de variabilidade sazonal e as variações em mais longa escala. A partir deste conjunto de dados foram construídas condições iniciais e de contorno para as variáveis utilizadas como forçantes do modelo numérico.

Foram utilizados médias mensais das séries temporais de descarga dos rios desde janeiro de 1940 até dezembro de 2006. Dados provenientes do banco de dados da OCCAM das variáveis: Velocidade (U e V); Temperatura, Salinidade e Superfície livre do mar, foram tratados desde o ano de 1990 até 2004. Os dados de vento e temperatura do ar, provenientes do Reanalysis (Kalnay et al., 1996) foram analisados desde o ano de 1948 até o ano de 2012.

2.6 Validação do modelo

Fernandes et al. (2001, 2002) e Monteiro (2006) apresentaram resultados de calibração e validação do modelo TELEMAC3D para o estuário da Lagoa dos Patos nas versões bidimensional e tridimensional. Posteriormente, Marques (2009); Marques et al. (2010b,a, 2012) realizaram um conjunto de simulações para a calibração e validação do modelo TELEMAC3D na região de estudo que abrange a Lagoa dos Patos e zona costeira adjacente.

Os resultados destes testes de calibração e validação indicaram que o modelo TE-

LEMAC3D pode ser utilizado para estudos na Plataforma Continental do Sul do Brasil com um grau de precisão aceitável. Como resultado dos estudos destes autores, foram estabelecidos valores de uma série de coeficientes físicos (como por exemplo, coeficiente de influência do vento, coeficiente de fricção e modelos de turbulência), que foram utilizados para a realização deste estudo (Tabela 2.4).

Tabela 2.4: Parâmetros utilizados na simulação.

Período de Simulação	1998 à 1999 (730 dias)
Passo de tempo	30 s
Coeficiente de Coriolis	$-7.70 \times 10^{-5} Nm^{-1}s^{-1}$
Modelo de turbulência horizontal	Smagorinsky
Modelo de turbulência vertical	Mixing length (Jet)
Lei de fricção de fundo	Manning e Nikuradse
Níveis Sigma	15

2.7 Tratamento dos resultados

Os resultados esperados deste trabalho, serão analisados sobre seus valores médios, desvio padrão, valores integrados e máximos, na forma demonstrada a seguir exemplificada para a velocidade (v):

$$Mdia = \sum_{t_i \rightarrow t_f} \frac{v(t)}{\Delta t} \quad (2.28)$$

$$DesvioPadro = STD_{t_i \rightarrow t_f} \frac{v(t)}{\Delta t} \quad (2.29)$$

$$Mximo = MAX_{t_i \rightarrow t_f} \frac{v(t)}{\Delta t} \quad (2.30)$$

$$Integrado = \sum_{t_i \rightarrow t_f} \frac{P(t)}{\Delta t} \quad (2.31)$$

A média (equação 2.7) será calculada através do somatório de todos os valores de velocidade em cada ponto, durante todos os passos de tempo ($t_i \rightarrow t_f$), e dividido pela variação total de tempo (Δt), ou seja, será uma média pontual durante toda a simulação. O mesmo vale para o desvio padrão (equação 2.7) , gerando valores de desvio padrão de cada ponto durante toda a simulação.

Para o cálculo dos valores máximos (equação 2.7), foi encontrado o valor máximo de velocidade (v) para cada ponto, durante todo o período de simulação. Enquanto que o cálculo dos valores integrados será calculado através do somatório de toda a potencia (P) gerada em cada ponto, durante todo o período de simulação.

Para encontrar os valores médios, máximos, desvios e integrados da potência, também serão utilizadas as equações citadas acima.

As análises de espectro energético foram realizadas pela utilização da técnica de ondaletas. As ondaletas são funções capazes de decompor e descrever outras funções no domínio da frequência, de forma que podemos analisar estas funções em diferentes escalas de frequência (e de tempo) simultaneamente. As análises foram aplicadas aos

dados usando adaptações do método de ondaletas descritos por Torrence and Compo (1997) e Morettin (2004). Para a análise de correlação foram extraídas séries temporais de potência elétrica e da intensidade da velocidade de corrente nos pontos de máxima ocorrência em cada região.

Capítulo 3

Resultados

O estudo do potencial para conversão de energia, realizado neste trabalho, compreende desde a escolha de um adequado mecanismo de conversão a ser simulado numericamente até a determinação dos locais mais propícios a conversão de energia na PCSB. Este formato de estudo, está de acordo com EPRI (2006) e Defne (2010), onde o primeiro passo para se determinar a viabilidade resulta no mapeamento da potencialidade dos recursos disponíveis. Através da compreensão deste mapeamento, esperamos contribuir para se chegar a viabilidade e a acessibilidade destes recursos.

Os campos médios de energia, campos de desvio padrão médio e campos de energia anual integrada foram calculados para todo o período de simulação. Os resultados foram analisados de forma comparativa, ressaltando as diferenças entre os picos de produção energética. Análises estatísticas foram aplicadas de forma a definir a viabilidade de conversão energética como função das correntes costeiras, além da sazonalidade no potencial energético da região.

As simulações com a consideração dos sítios de conversão de energia permitiram a

análise da variabilidade temporal na conversão energética pela utilização de ondaletas unidimensionais, enquanto que, a variabilidade espacial no processo de conversão energética foi investigada pela utilização de ondaletas bidimensionais e pelos campos de conversão de energia nos sítios de conversores. Finalmente, os eventos de alta geração energética foram determinados e avaliados do ponto de vista energético.

3.1 Potencial da conversão de energia na Plataforma Continental do Sul do Brasil

Os possíveis locais para instalação de turbinas na costa do Rio Grande do Sul foram avaliados através da modelagem numérica tridimensional. A potência gerada pelos conversores de corrente foi estimada pelo módulo de conversão de energia, e os resultados foram analisados de acordo com os locais de maior produção energética da região costeira. Nestas regiões foram obtidas séries temporais de potência elétrica convertida, as quais foram analisadas através do uso da transformada de ondaletas, de forma a obter as escalas de variabilidade energética dominantes para a região.

Na simulação realizada para este estudo, foi observado que, durante o período de 2 anos, as velocidades máximas encontradas na região de estudo (Kirinus et al., 2013a,b) foram de 1.8 m/s nas duas regiões. Estes resultados corroboram e fortalecem o uso da parametrização dos conversores de Marques et al. (2012) para a região de estudo, utilizando a velocidade nominal de 1.5 m/s (Tabela 2.2).

A turbina de rotação unidirecional é bastante utilizada para aplicações em fluxos controlados ou constantes como correntes de marés e rios canalizados, pois possui maior coeficiente de eficiência. Entretanto, devido às condições hidrodinâmicas da região, caracterizadas pelo encontro de diferentes massas de água (Costa, 2009) e de dinâmica complexa (Piola et al., 2008; Castro et al., 2006), seria necessária a utilização de uma turbina que convertesse a energia das correntes de forma multidirecional (Khan et al., 2009). Neste caso, a turbina de hélice helicoidal (Gorlov, 2010) aparece como opção mais adequada, pois esta turbina é capaz de gerar energia a partir de rotações no mesmo sentido, rotações unidirecionais independentes da direção da corrente que atinge o rotor

(Hammons, 1993).

Para identificar as maiores intensidades de corrente, foram criados mapas de velocidade média da corrente e seu desvio padrão durante os 730 dias de simulação. A figura 3.1 a.) apresenta a velocidade média de corrente variando de zero a 0.4 m/s , enquanto a figura 3.1 b.) apresenta o desvio padrão da velocidade de corrente, que varia de zero a 0.35 m/s .

Este valor médio está associado a uma variabilidade. Desta forma é possível observar que o desvio padrão da velocidade de corrente (figura 3.1 b.) está distribuído pelas mesmas regiões de altos valores médios (figura 3.1 a.). Este resultado sugere que, ao mesmo tempo em que estas regiões são propícias a conversão de energia elétrica, estas também podem passar por períodos grande variabilidade, inclusive com baixa geração energética, visto que o desvio padrão da velocidade apresenta um valor próximo à média.

Os dois locais em destaque na figura 3.1 serão referenciados nas próximas seções como *região norte* - compreendida entre Solidão e ao sul do Farol da Conceição (figura 1.5 b.) - e *região sul*, espacialmente definido desde o Sarita, ao norte, e ao sul do Albardão (figura 1.5 c.).

A análise dessa seção será baseada em campos médios, dessa forma, a profundidade média considerada para as regiões foi de 20m para o norte, e 15m para a região sul. Sendo assim, a potência foi estimada com turbinas de altura iguais a batimetria e diâmetro de 16m, portanto a potência nominal dessas turbinas é de $P_{norte} = 193\text{kW}$ e $P_{sul} = 145\text{kW}$ (considerando $v_{nominal} = 1.5\text{m/s}$; $\rho = 1025\text{kg/m}^3$; $\eta = 0.35$).

A figura 3.2 apresenta a análise da potência convertida através da média, desvio

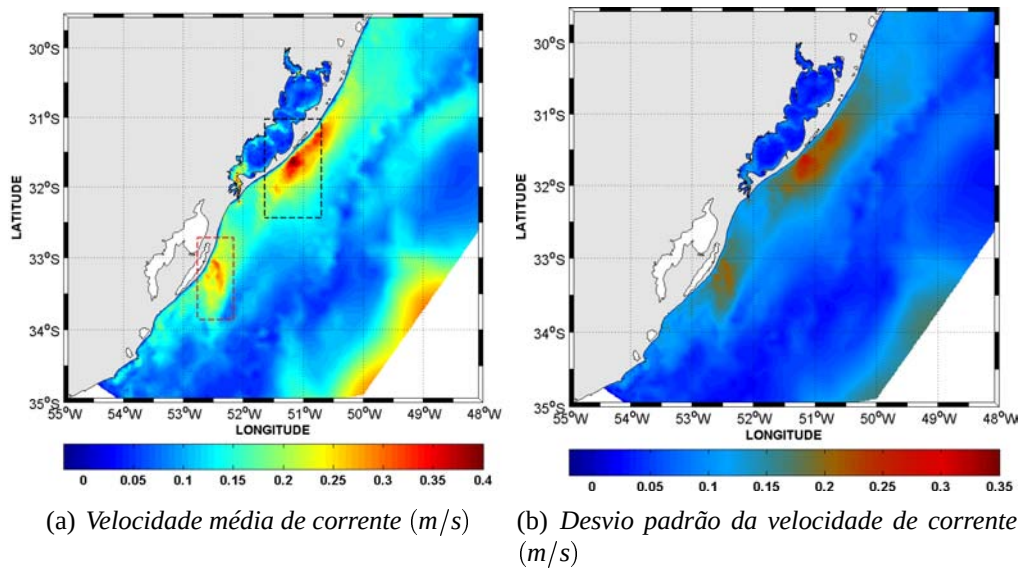


Figura 3.1: (a) Velocidade média de corrente (m/s) e seu desvio padrão (b) durante todo o período de simulação. Em destaque, a região sul na área tracejada em vermelho, e a região norte tracejada em preto.

padrão e máximo em kW/Dia , além da potência integrada em MW/Ano . A região norte está em destaque nestas figuras sendo possível observar duas regiões com maior potencial de geração de energia, uma região no formato triangular ao centro da figura, e outra mais ao norte ($31^{\circ} 15' S$ e $50^{\circ} 40' W$).

Na região norte (figura 3.2), onde as isolinhas de batimetria são mais próximas, ou seja, apresentam uma maior declividade, são esperados valores de potência média (figura 3.2 a.) em torno de $7kW/Dia$, enquanto que na região em que as isolinhas estão mais afastadas e com menores declividades, na isolinha de 20m, percebemos uma intensificação da potência média para $10kW/Dia$.

Nessas mesmas regiões, são estimados os picos máximos de potência (figura 3.2 c.), alcançando $180kW/Dia$, enquanto que para o desvio padrão (figura 3.2 b.) nesta região, são esperados valores superiores à média, em torno de $20kW/Dia$. A potência

integrada (figura 3.2 d.) da região norte pode alcançar valores em torno de 3.5 MW/Ano , representando um alto potencial para a conversão de energia das correntes nesta região.

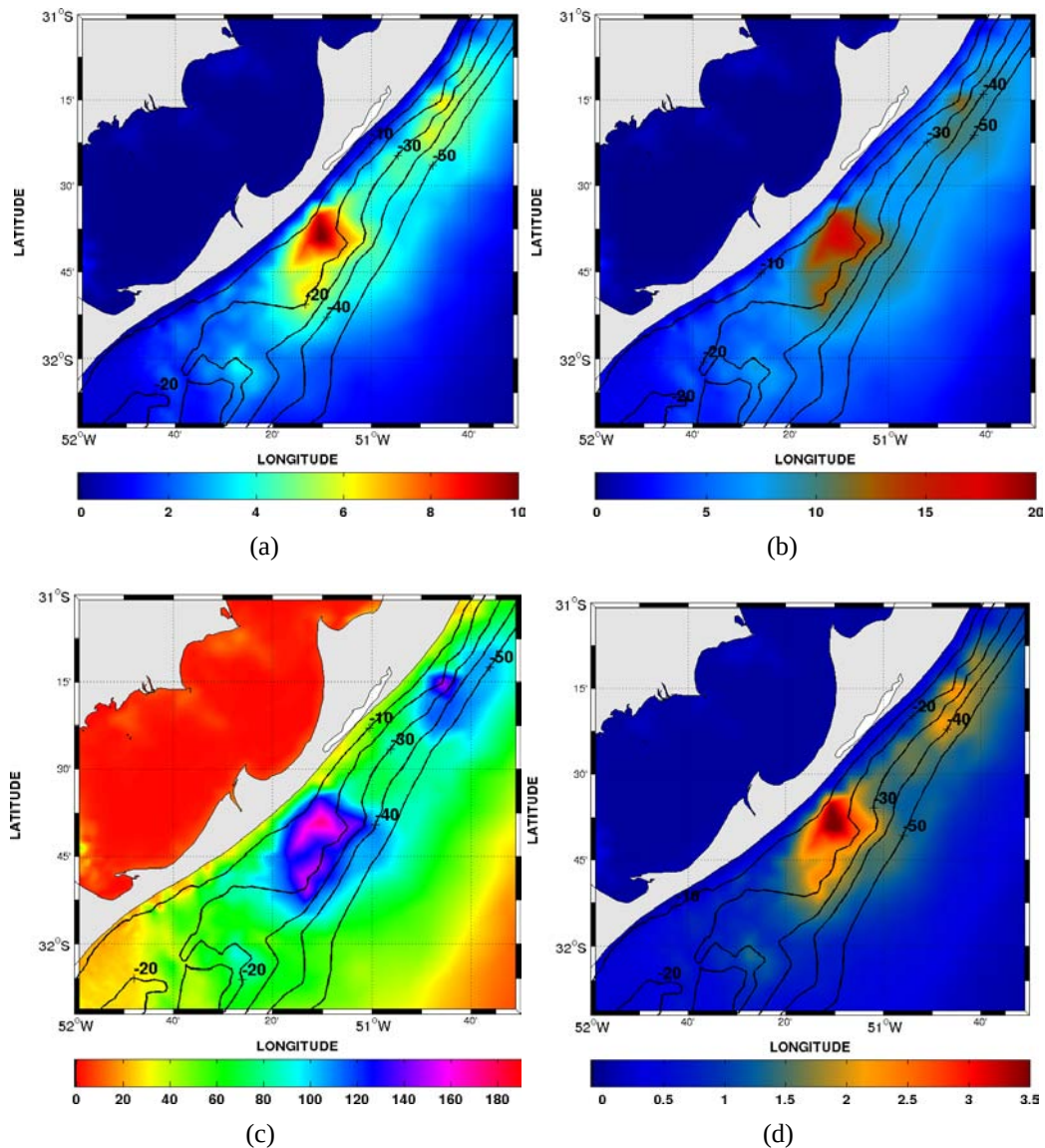


Figura 3.2: Análise da potência para a região de interesse ao norte. (a) Energia média (kW/Dia); (b) Desvio padrão da potência (kW/Dia); (c) Energia máxima (kW/Dia); (d) Energia integrada (MW/Ano). A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.

A região sul (figura 3.3), apresenta um padrão distinto de batimetria, as isolinhas

estão mais afastadas, entretanto o relevo submarino apresenta grandes irregularidades. É possível observar altos valores de potência média por quase toda a extensão da plataforma continental interna entre as isolinhas de 10m e 20m de profundidade. Nesta região, valores de potência média (figura 3.3 a.) em torno de $3.5kW/Dia$ são esperados.

Para a região sul são estimados picos máximos de potência (figura 3.3 c.), alcançando cerca de $80kW/Dia$. Para o desvio padrão (figura 3.3 b.) nesta região, são esperados valores superiores à média, em torno de $9kW/Dia$. A potência integrada (figura 3.3 d.) da região sul pode alcançar valores em torno de $1.5MW/Ano$. Apesar de possuir menor potencial energético do que a região norte, a região sul também representa um alto potencial para a conversão de energia das correntes.

A figura 3.4 apresenta os histogramas espaço-temporais de frequência de velocidades de corrente superiores a $0.2 m/s$ para as regiões destacadas anteriormente. Nesta figura podemos observar que as regiões mais propícias para a conversão de energia são, ao mesmo tempo, as regiões que apresentam durante o maior tempo possível, as maiores ocorrências de altas intensidades de correntes. Com esta análise, podemos encontrar os locais mais adequados para a instalação de um conversor, julgando que ele necessite de ao menos $0.2 m/s$ de velocidade incidente (Douglas et al., 2008) para iniciar seu movimento de rotação e subsequente conversão.

Podemos verificar que, além das regiões apresentarem alto potencial energético, elas também representam os locais onde ocorrem as maiores frequências (tons avermelhados na figura 3.4) de altas velocidades de corrente dentro da Plataforma Continental Interna. A região *norte* se destaca com frequências de 600 dias de velocidades superiores a $0.2 m/s$, enquanto que a região sul possui 450 dias de frequência (figura 3.4 b.).

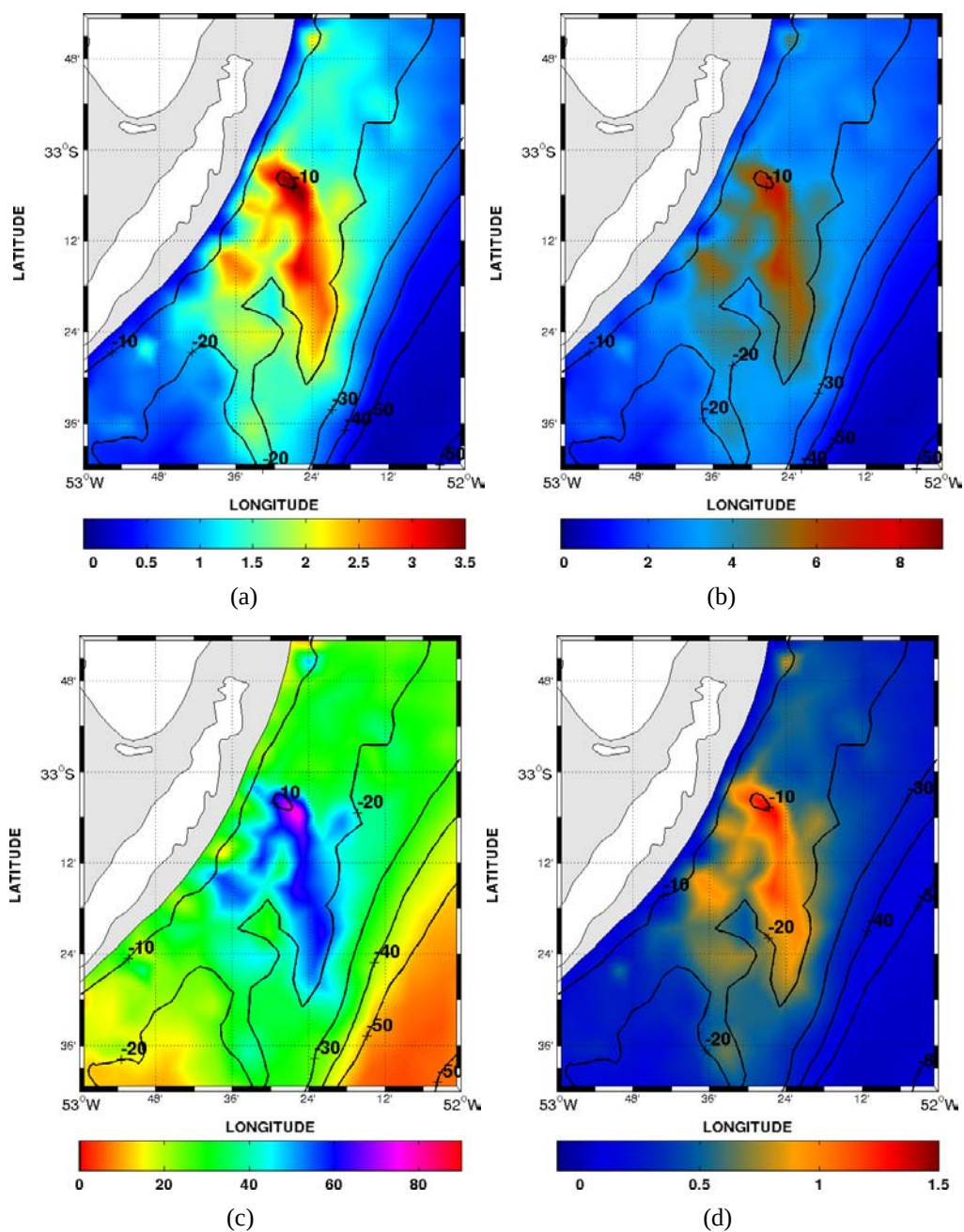


Figura 3.3: Análise da potência para a região de interesse ao sul. (a) Energia média (kW/Dia); (b) Desvio padrão da potência (kW/Dia); (c) Energia máxima (kW/Dia); (d) Energia integrada (MW/Ano). A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.

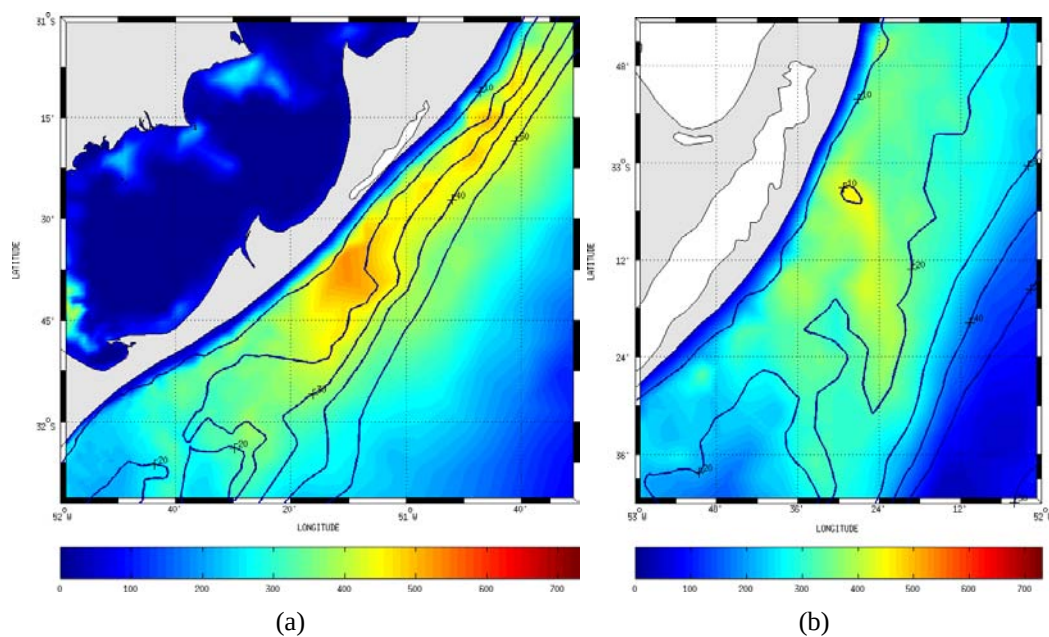


Figura 3.4: *Histograma espacial de frequência durante os 730 dias de simulação. A escala de cores representa o número de dia de ocorrência de velocidades de corrente superiores a 0.2m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.*

Através de análise de espectro energético para a região norte, a série temporal da potência (figura 3.5 a.) foi cruzada com a série temporal da intensidade de corrente apresentando correlação direta entre os parâmetros. Ao passo que a intensidade da corrente aumenta, a potência energética gerada se intensifica, entretanto, quando as intensidades da velocidade de corrente se apresentam muito abaixo de $0.6m/s$, os valores da potência reduzem consideravelmente.

Este fato é corroborado pelo espectro local de energia (figura 3.5 b.), pois em cada passo de tempo em que a velocidade supera $0.6m/s$, vemos uma intensificação na correlação (tons de vermelho), por outro lado, as fracas correlações entre as baixas intensidades da velocidade de corrente e a potência são representadas pelos tons em azul.

Percebemos que os processos físicos que dominam o alto potencial energético ocorrem em ciclos com escala temporal menor que 16 dias podendo se prolongar em certos momentos. O espectro global de energia (figura 3.5 c.) fortalece esta afirmativa, indicando a importância desses processos para a geração de energia.

Para a região sul, a série temporal da potência (figura 3.6 a.) apresenta o mesmo padrão de correlação direta entre altas intensidade da corrente e alta conversão de energia elétrica. O espectro de energia local (figura 3.6 b.), sugere o mesmo padrão de correlação, onde se percebe que os processos físicos que dominam a alta geração de energia possuem intervalos menores que 16 *dias*. Para esta região, o espectro global de energia (figura 3.6 c.) também corrobora esta análise.

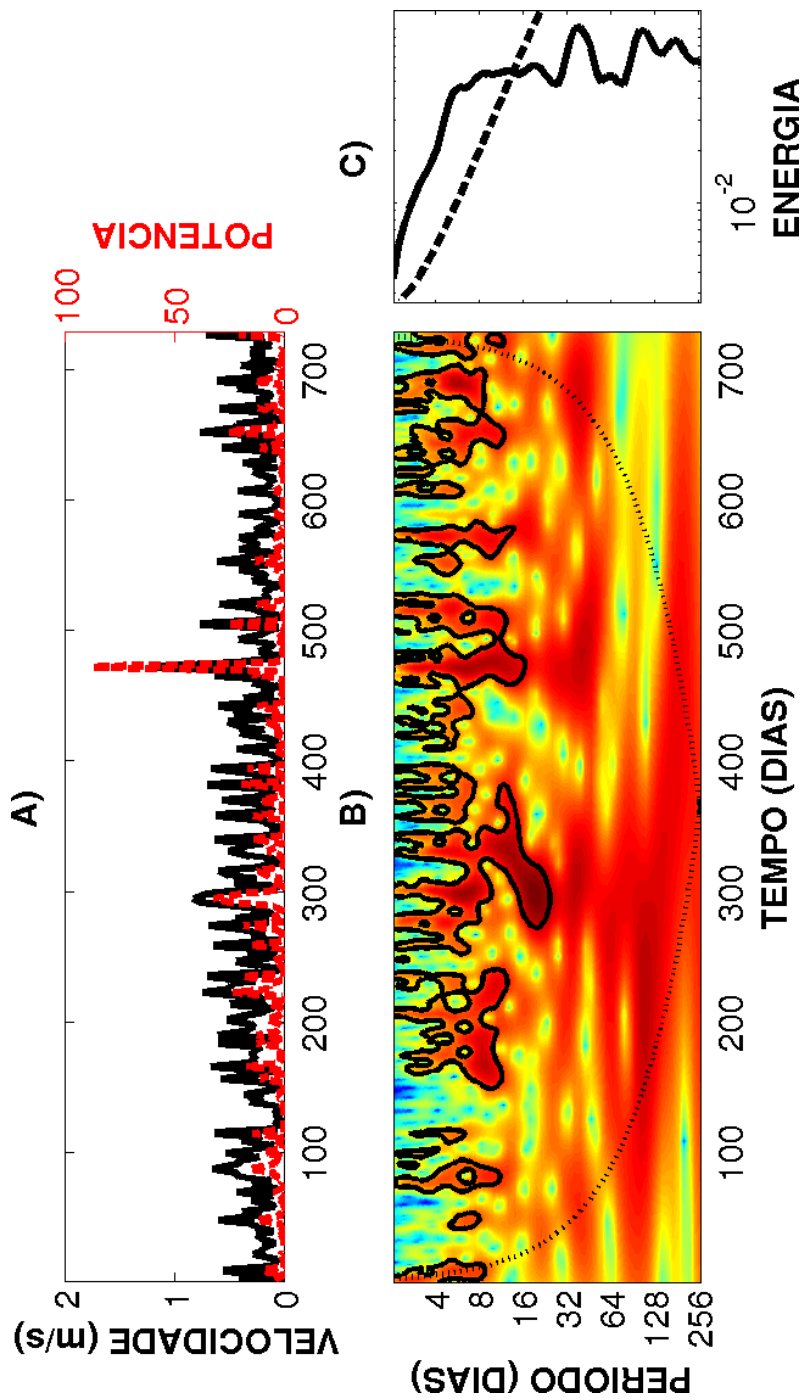


Figura 3.5: Análise da ondaleta para a região norte. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente e da potência elétrica (kW/Dia) utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de energia local. (c) Espectro cruzado de energia global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.

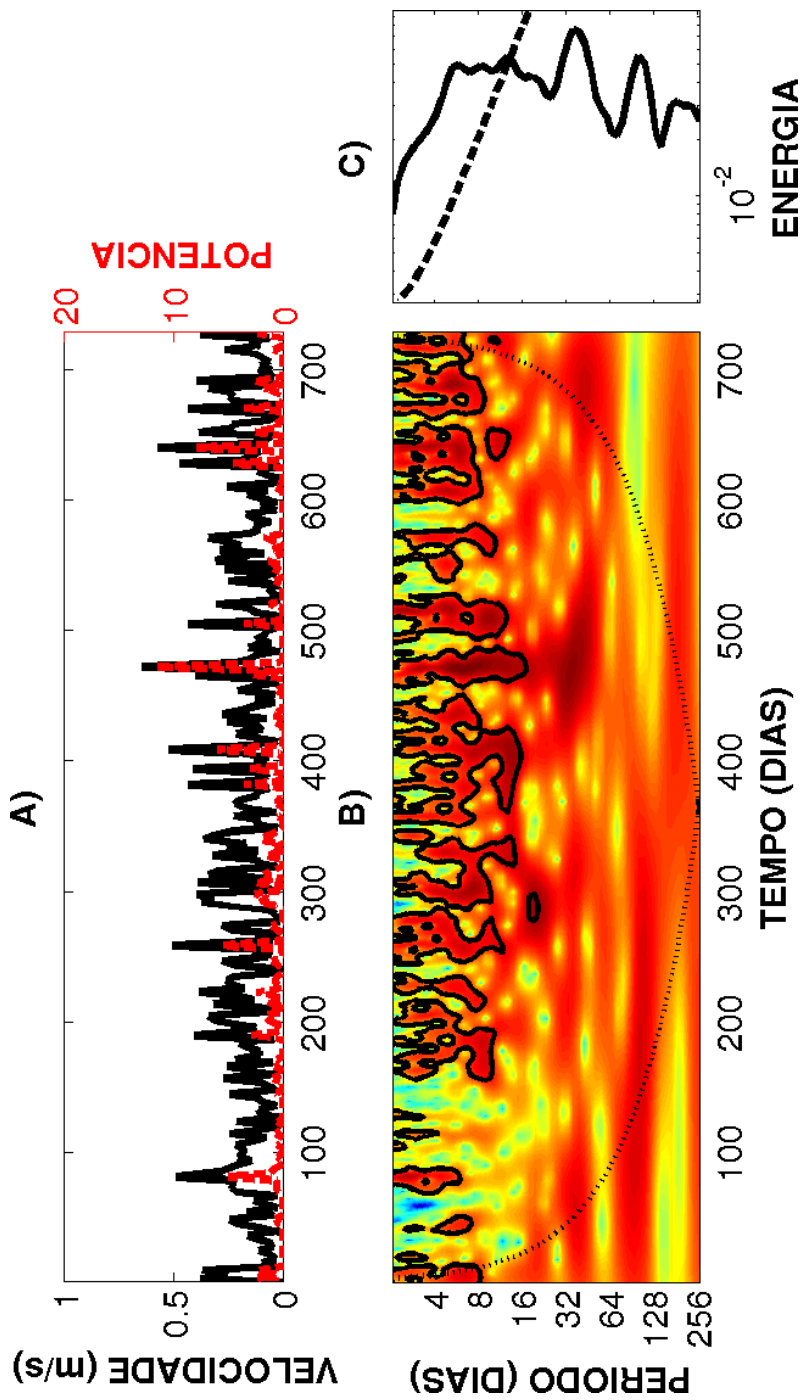


Figura 3.6: Análise da ondaleta para a região sul. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente e da potência elétrica (kW/Dia) utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de energia local. (c) Espectro cruzado de energia global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.

3.2 Sazonalidade da Conversão Energética

A partir das discussões levantadas na seção anterior (3.1), podemos realizar uma análise de sazonalidade nas regiões de maior viabilidade energética da Plataforma Continental Interna do Sul do Brasil (Mendes, 1994). Para esta análise, foram selecionados os intervalos referentes às estações do ano (3.1),

Tabela 3.1: Períodos selecionados durante os 730 dias de simulação. Note que a estação do verão possui menor período devido ao tempo de simulação escolhido.

Estação do Ano	Dias de simulação selecionados
Verão	172
Outono	186
Inverno	190
Primavera	182

3.2.1 Região Norte

Para a análise da sazonalidade da velocidade e consequentemente potencial energético da região norte, foram produzidos mapas superficiais dos principais parâmetros. A fim de se possibilitar a comparação entre as estações do ano, as escalas dos gráficos foram padronizadas para evidenciar quaisquer alterações forçadas pela sazonalidade. A velocidade média varia de 0 a $0,5m/s$ e seu desvio padrão varia de 0 a $0,35m/s$, enquanto a potência média varia de 0 a $15kW/Dia$ e seu desvio padrão de 0 a $22kW/Dia$. A potência integrada durante todo o período da estação considerada varia de 0 a $1.5MW/Estao$.

Inverno e Primavera

A velocidade média de corrente foi analisada durante todo o período de inverno (figura 3.7 a.) e primavera (figura 3.7 c.), devido a observação de valores mais extremos nestas estações, sendo possível observar valores médios alcançando extremos de $0,5m/s$ na primavera em uma região mais ampla da plataforma continental quando comparada com a estação do inverno. Entretanto, este valor médio apresenta um desvio padrão menor durante o inverno (figura 3.7 b.) quando comparado com a estação da primavera (figura 3.7 c.)

Durante o inverno (figuras 3.8 a,b,c), são esperados valores médios de potência (figura 3.8 a) em torno de $9kW/Dia$, enquanto o desvio padrão gira em torno de $15kW/Dia$ e a potência integrada pode alcançar até $0.9MW/Inverno$. Durante os períodos de primavera foram estimados os valores máximos de potência média (figuras 3.8 d,e,f), acima de $15kW/Dia$ e com um desvio padrão superior ao do inverno, com valores que chegam a $22kW/Dia$. Desta forma potência integrada atinge valores superiores a $1.3MW/Primavera$.

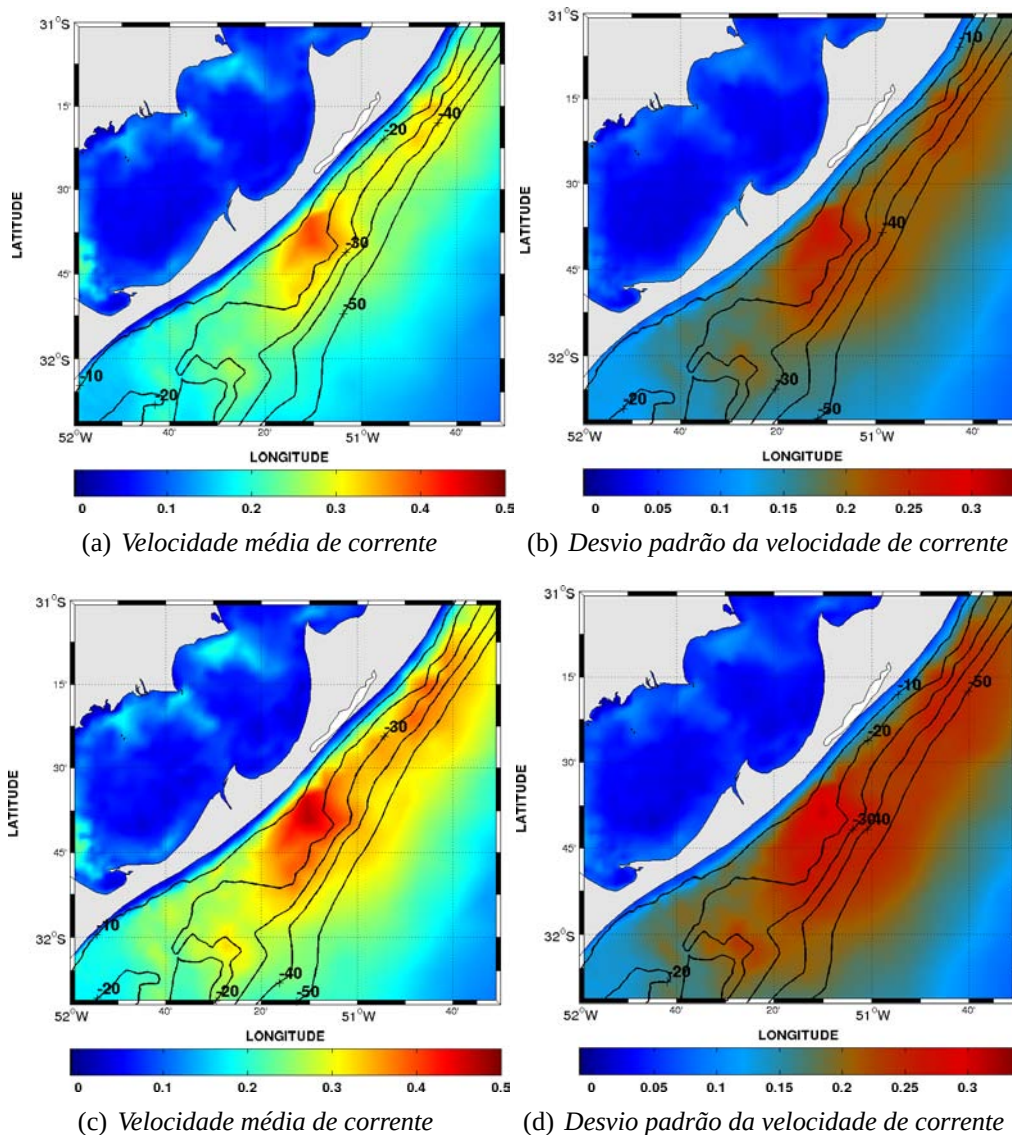


Figura 3.7: Média e Desvio padrão sazonal da velocidade para a **região norte durante o inverno (a,b) e durante a primavera (c,d)** em m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.

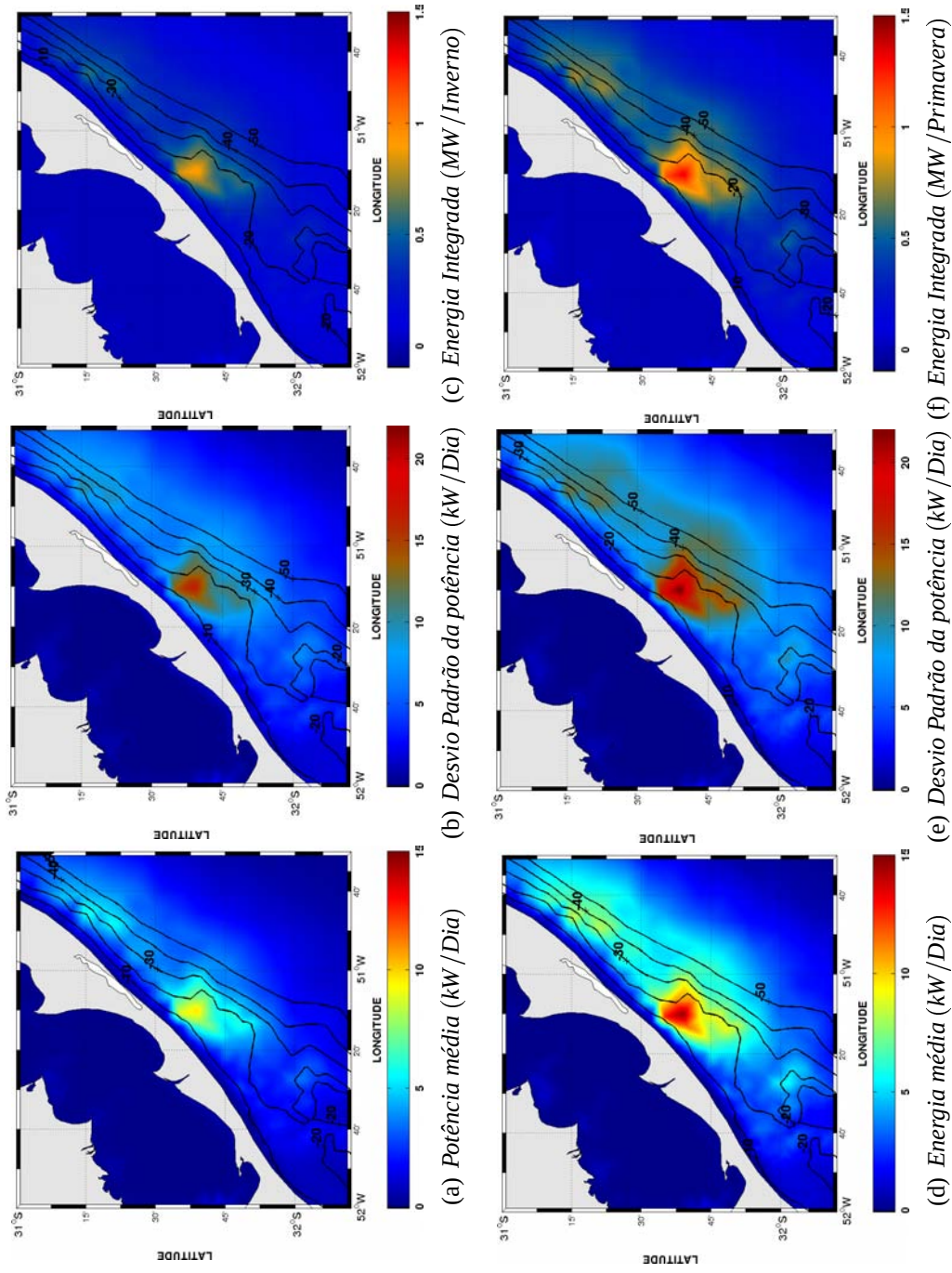


Figura 3.8: Análise da potência para a região de interesse ao norte durante o inverno (a,b,c) e durante a primavera (d,e,f). A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.

Verão e Outono

Durante as estações de verão e outono foram observadas leves diferenças entre as estações. A velocidade média de corrente do verão (figura 3.9 a.) e do outono (figura 3.9 c.), permanecem quase semelhantes, sendo possível observar valores médios em torno de $0,35m/s$. Entretanto, o desvio padrão da velocidade de corrente durante o outono (figura 3.9 d.) foi superior à da estação do verão atingindo valores em torno de $0,3m/s$, enquanto que, no verão (figura 3.9 b.) foram valores de desvio padrão de $0,25m/s$.

Durante o verão foram observados valores de potência média (figura 3.10 a) maiores do que durante o outono (figuras 3.10 d) para a região norte, onde no verão a potência média estimada atingiu $7.5kW/Dia$ e, no outono $9kW/Dia$. Em relação ao desvio padrão da potência, durante o verão percebemos menores desvios, permanecendo em torno de $13kW/Dia$, enquanto que durante o outono, o desvio padrão foi superior alcançando valores em torno de $20kW/Dia$. A potência integrada entretanto, não apresenta diferenças significativas, apresentando valores máximos de $0.8MW/Verão$ no verão e $1.0MW/Outono$ durante o outono.

Este resultado sugere que, ao mesmo tempo que a região norte é propícia para a conversão de correntes marinhas em potência elétrica, variações sazonais podem aumentar ou diminuir o potencial energético da região. Desta forma, podemos inferir que as estações do inverno, verão e outono se comportam de maneira similar, gerando quantidades de potência em média (em torno de 7.5 a $9.0kW/Dia$). Enquanto a primavera se destacou como a estação do ano mais energética, podendo produzir $1.3MW/Primavera$ de potência integrada, mas podendo passar por períodos de menor potencial energético, visto que também se estimou um maior desvio padrão para esta estação do ano.

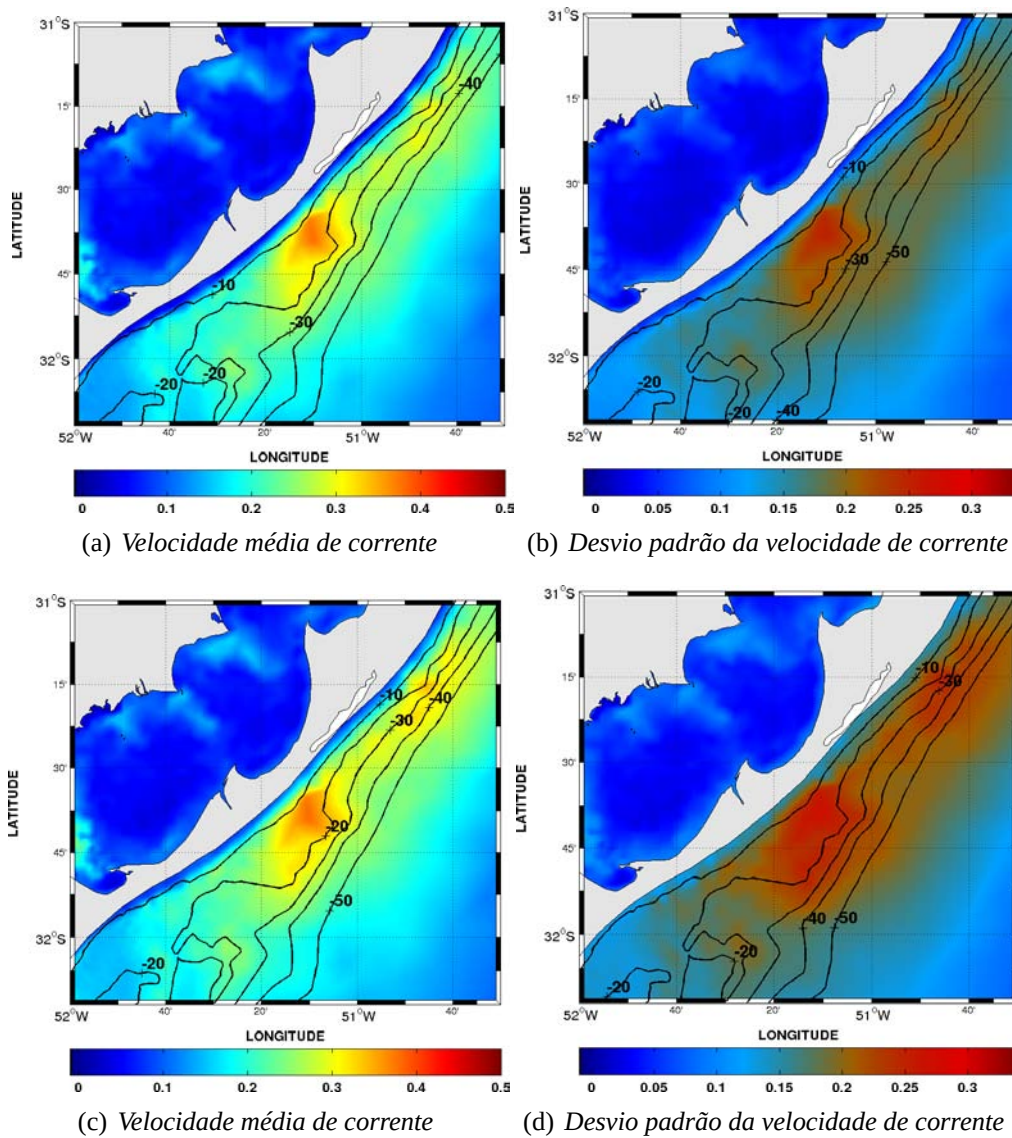


Figura 3.9: Média e Desvio padrão sazonal da velocidade para a **região norte durante o verão (a,b) e durante o outono (c,d)** em m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.

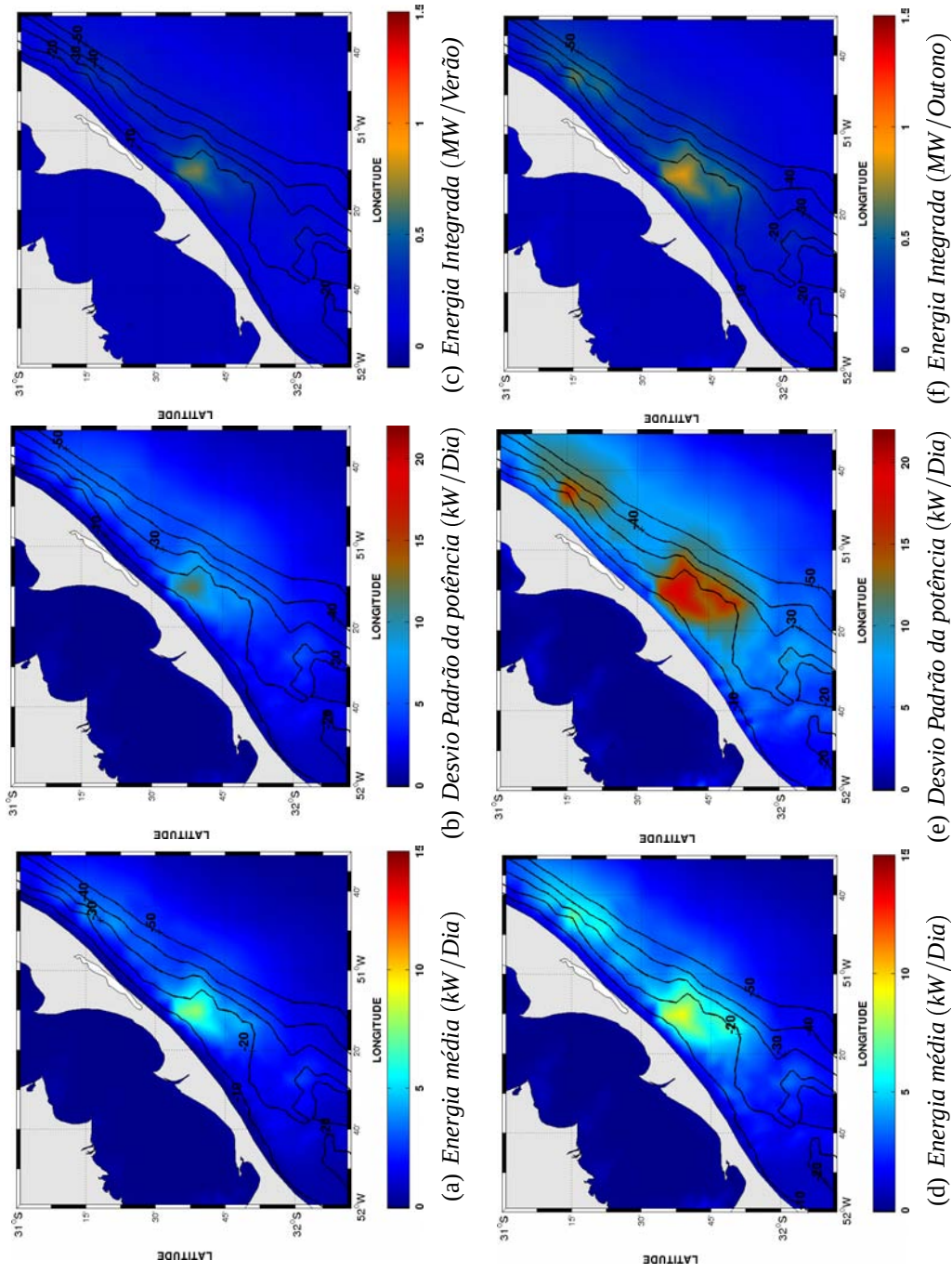


Figura 3.10: Análise da potência para a região de interesse ao norte durante o verão (a,b,c) e durante o outono (d,e,f). A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.

3.2.2 Região Sul

Os mesmos procedimentos aplicados a região norte, foram aplicados a região sul. A velocidade média variou de 0 a $0,35m/s$, enquanto seu desvio padrão foi de 0 a $0,25m/s$, enquanto a potência média variou de 0 a $16kW/Dia$ e seu desvio padrão de 0 a $35kW/Dia$. A potência integrada durante todo o período da estação do ano variou de 0 a $0.45MW/Estao$.

Inverno e Primavera

Para a região sul, a velocidade média de corrente durante todo o período de inverno (figura 3.11 a.) foi levemente inferior ao da primavera (figura 3.11 c.), sendo possível observar valores médios alcançando extremos na primavera de $0,35m/s$. Da mesma forma, o desvio padrão da velocidade de corrente durante o inverno (figura 3.11 b.) foi menor quando comparado com a primavera (figura 3.11 c.), podendo alcançar valores de até $0,25m/s$.

O mesmo comportamento visto com a velocidade média de correntes é observado para a potência convertida. Durante a situação de inverno (figuras 3.12 a,b,c), o potencial da potência média e o desvio padrão médio apresentam valores de $3.5 \pm 8kW/Dia$, e sua potência integrada pode alcançar $0.35MW/Inverno$. Na primavera (figuras 3.12 d,e,f), é encontrado um comportamento mais energético com valor médio e desvio padrão de $5 \pm 8kW/Dia$, acarretando em uma maior quantidade de potência integrada, com valores de até $0.45MW/Primavera$.

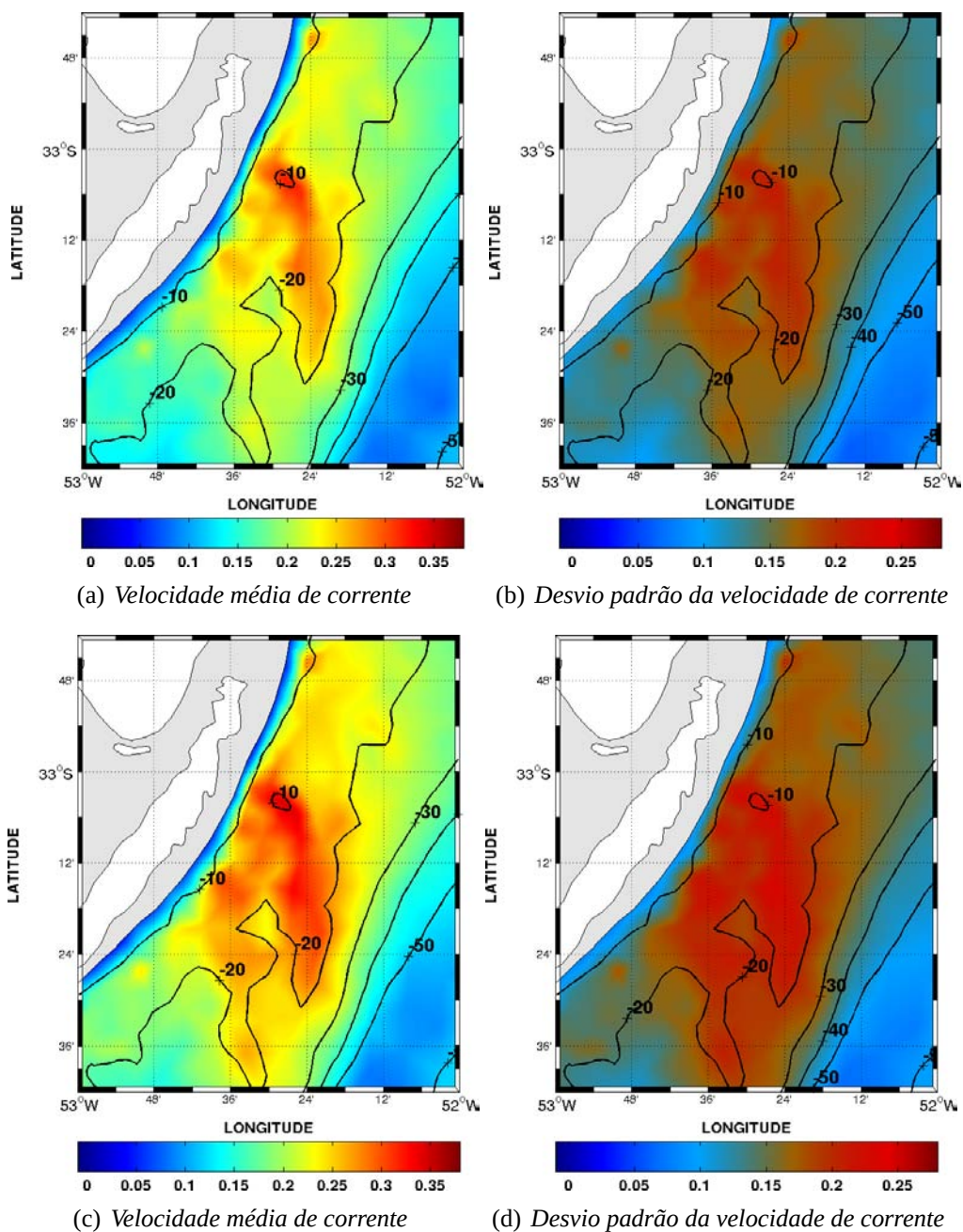


Figura 3.11: Média e Desvio padrão sazonal da velocidade para a **região sul** durante o **inverno (a,b)** e durante a **primavera (c,d)** em m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.

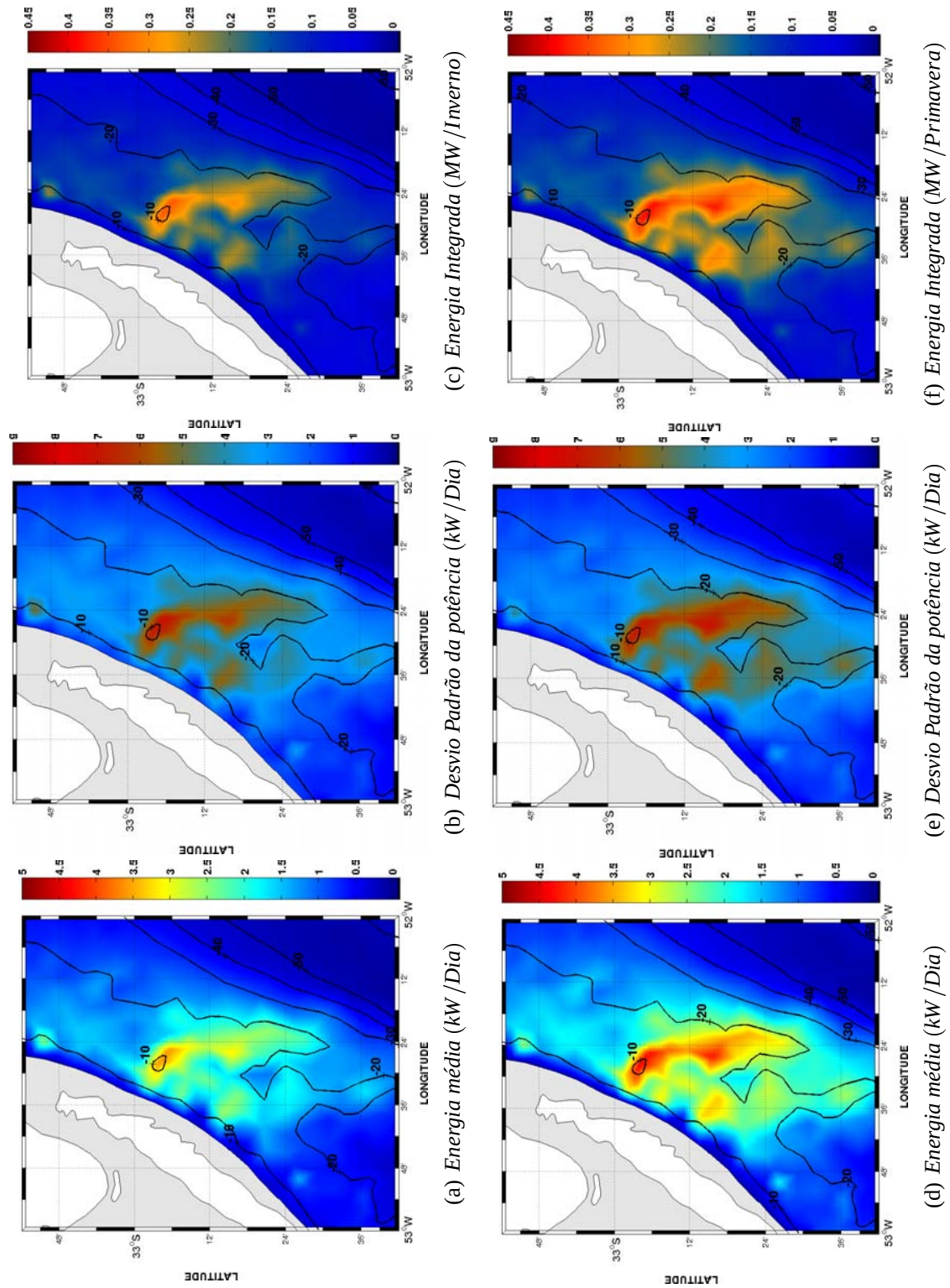


Figura 3.12: Análise da potência para a região de interesse ao sul durante o inverno (a,b,c) e durante a primavera (d,e,f). A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.

Verão e Outono

O padrão de sazonalidade observado para a região norte pode ser também verificado para a região sul. Durante as estações de verão e outono foram estimadas poucas diferenças. A velocidade média de corrente do verão (figura 3.13 a.) e do outono (figura 3.13 c.), permaneceram quase semelhantes, sendo possível observar valores médios em torno de $0,30m/s$. Entretanto, o desvio padrão da velocidade de corrente durante o outono (figura 3.9 d.) foi superior à da estação do verão, atingindo valores em torno de $0,23m/s$, enquanto que no verão (figura 3.9 b.) foram observados valores de desvio padrão de $0,18m/s$.

Analisando os parâmetros energéticos, conclui-se que existe grande disparidade entre verão e outono na região sul. Durante o verão foi observado o mínimo de produção energética, além de menores valores de desvio padrão ($2.5 \pm 4,5kW/Dia$), gerando consequentemente uma menor potência integrada ($0.25MW/Verão$). Por outro lado, durante o outono, ocorreram médias e desvios mais elevados, em torno de $4 \pm 9kW/Dia$, situação que proporcionou uma quantidade de potência integrada de até $0.35MW/Outono$.

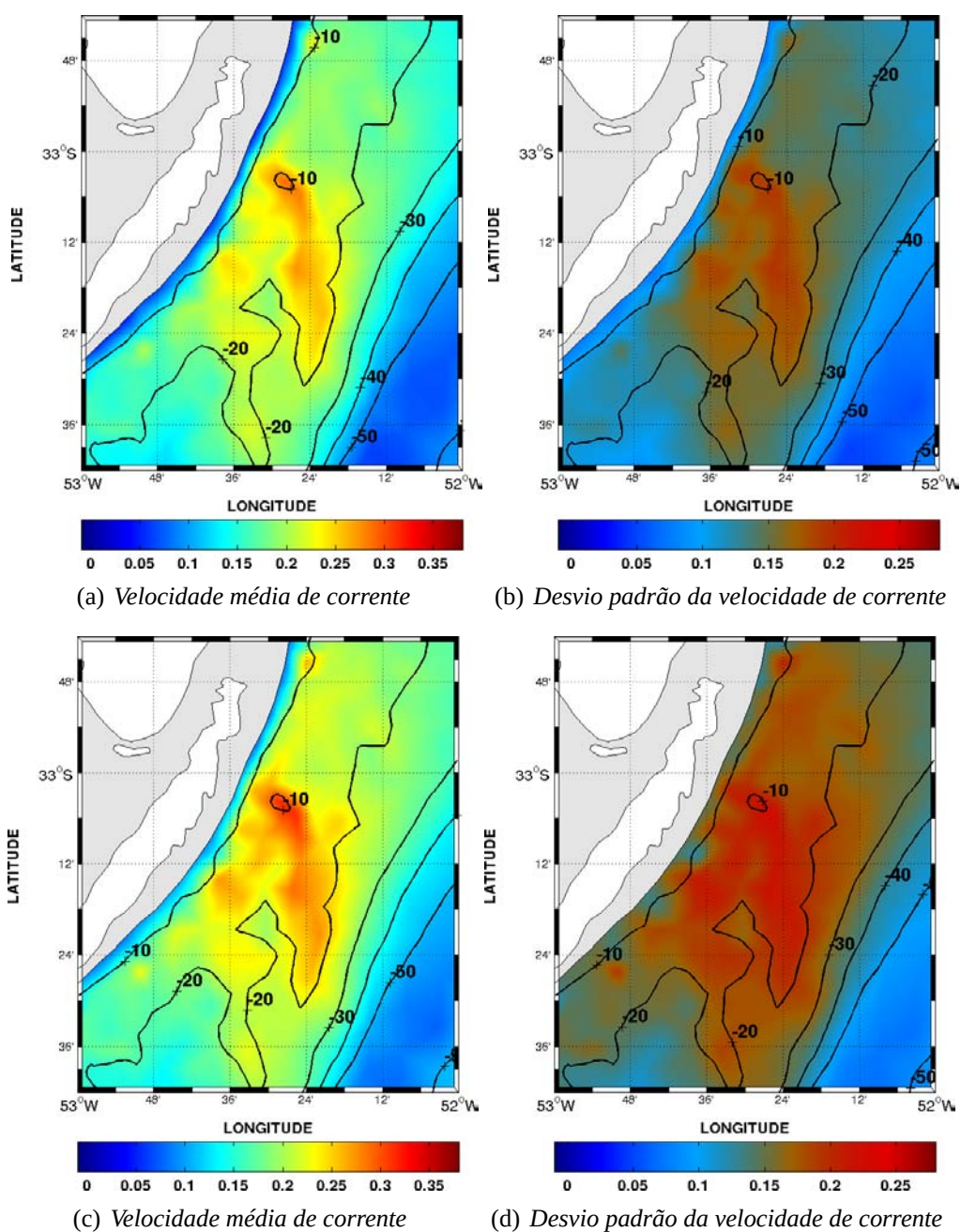
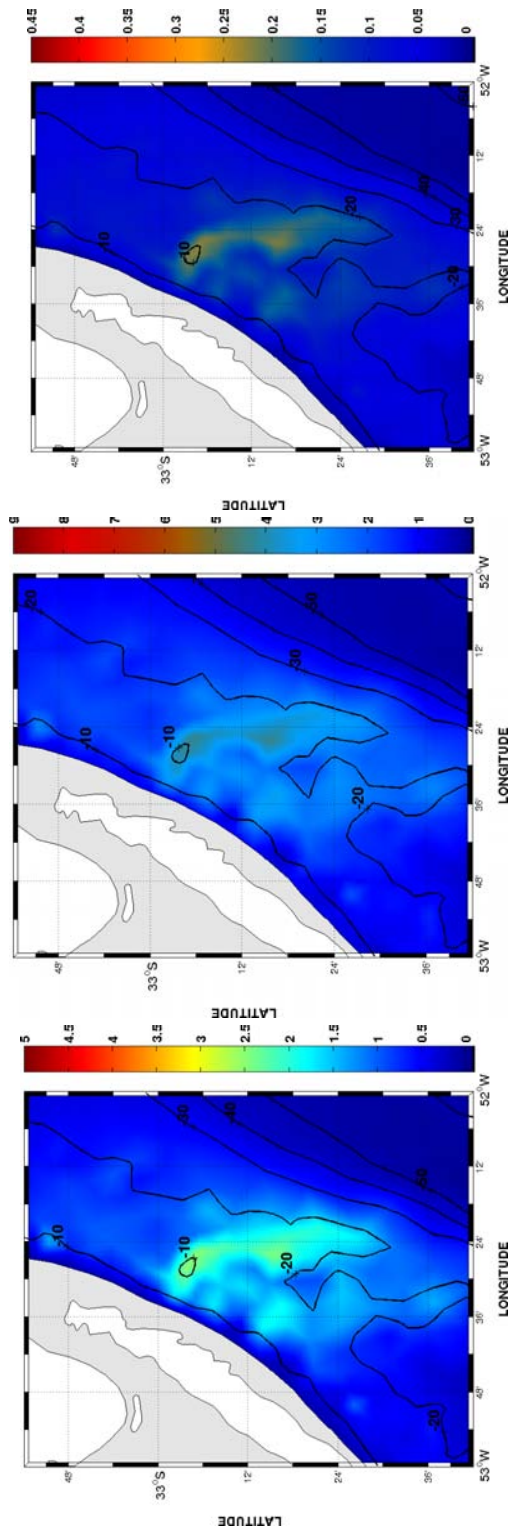
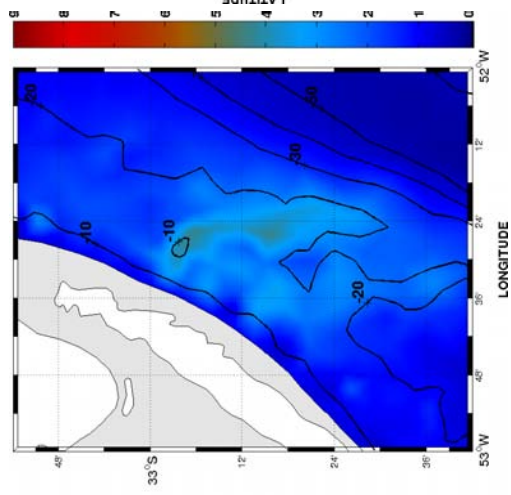


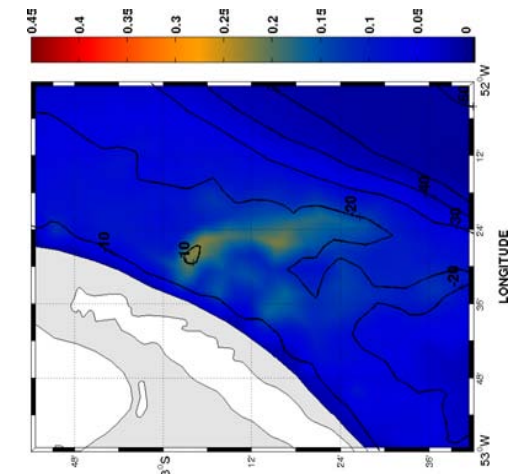
Figura 3.13: Média e Desvio padrão sazonal da velocidade para a **região sul** durante o verão (a,b) e durante o outono (c,d) em m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.



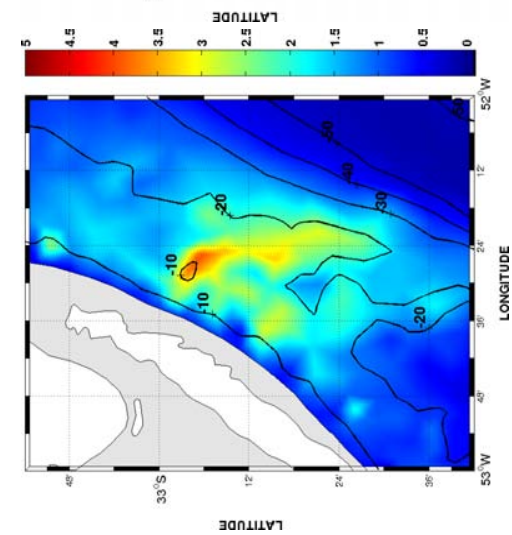
(a) Energia média (kW /Dia)



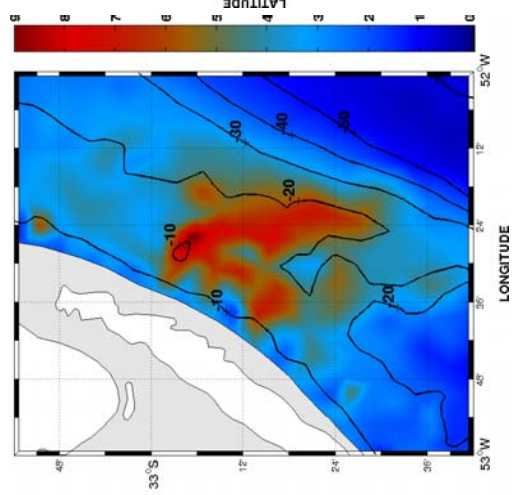
(b) Desvio Padrão da potência (kW /Dia)



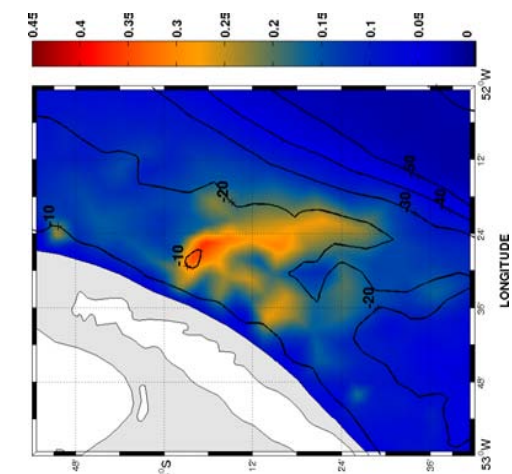
(c) Potência Integrada (MW /Verão)



(d) Potência média (kW /Dia)



(e) Desvio Padrão da potência (kW /Dia)



(f) Potência Integrada (MW /Outono)

Figura 3.14: Análise da potência para a região de interesse ao sul durante o verão (a,b,c) e durante o outono (d,e,f). A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.

Na figura 3.15 podemos notar, nos histogramas espaço-temporais de frequência, que a região *norte* apresenta 150 dias de velocidades superiores a 0.2 m/s nas estações do inverno e primavera, enquanto que no outono e verão, apresentam frequência de 120 dias.

Por outro lado, a região *sul* (figura 3.16) apresenta maiores frequências de baixas velocidades. A estação da primavera demonstra ter correntes mais intensificadas durante todo o período de simulação, pois apresenta apenas 120 dias de velocidades inferiores a 0.2 m/s . Entretanto, as estações do inverno, outono e verão apresentam praticamente a mesma frequência, em torno de 100 dias.

A região norte desponta com ótimo potencial para geração de energia em todas as estações do ano, entretanto possui baixa estabilidade para a conversão desta energia. Sazonalmente, a primavera é a melhor estação sendo capaz de produzir em média $15 \pm 22 \text{ kW/Dia}$, atingindo uma potência integrada superior de até 1.3 MW/Primavera . Para corroborar esta afirmativa, histogramas de frequência (figuras 3.17 a. e 3.18 a.) das intensidades de corrente e da potência foram analisados para cada estação, demonstrando que durante a primavera, a maior frequência de intensidade de corrente está entre 0.6 e 0.9 m/s .

Entretanto, a primavera apresenta eventos de frequências superiores a 17 kW/Dia . Esta alta frequência resulta do alto desvio padrão esperado para este período, denotando em certos momentos, a região é influenciada por correntes de grandes intensidades. No histograma de frequência da potência (figura 3.18 a.), são observadas as maiores potências e o maior desvio padrão, em decorrência das grandes variações de corrente durante o período.

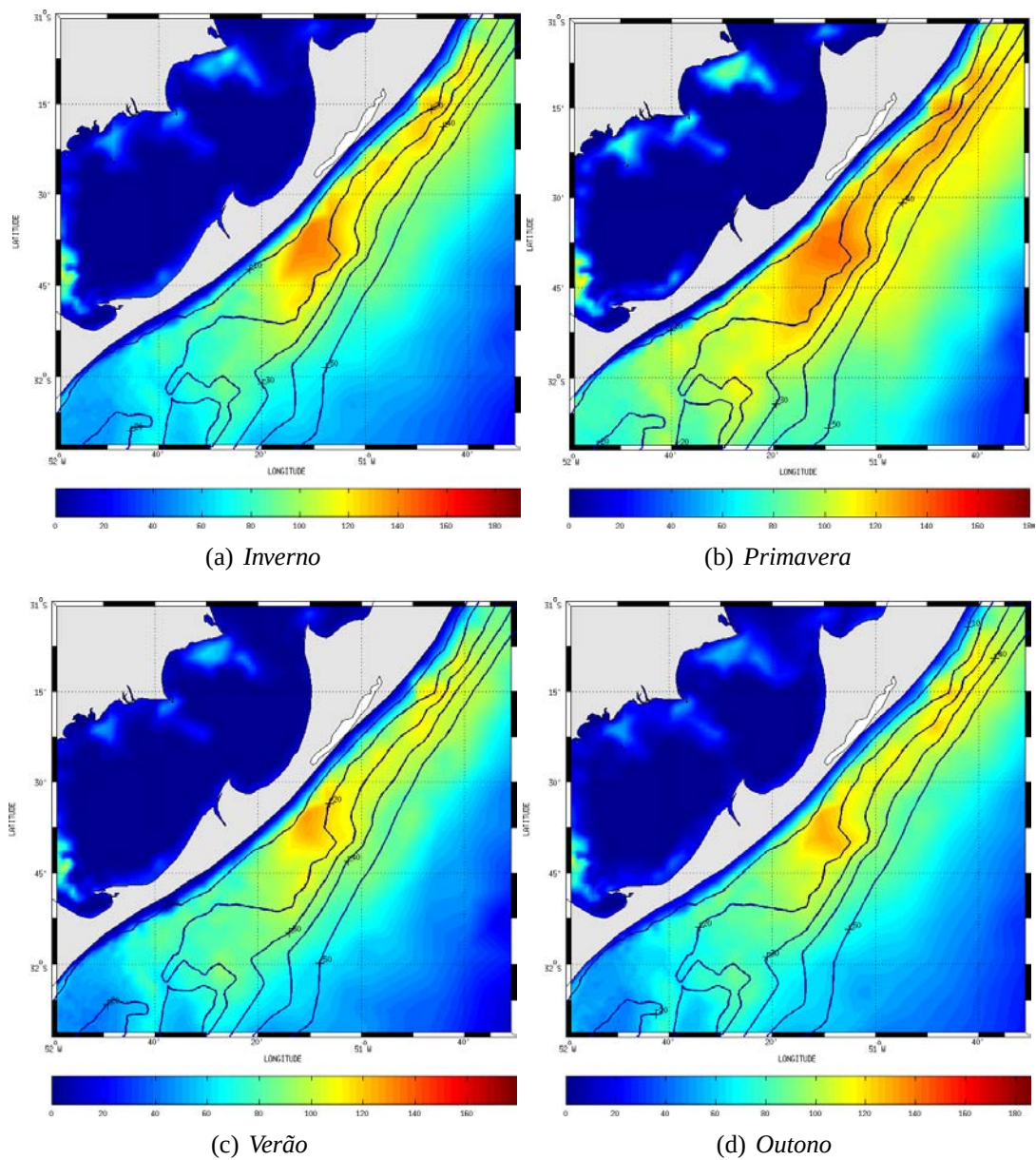


Figura 3.15: *Histograma espacial de frequência de acordo com a duração de cada estação do ano para a região norte. A escala de cores representa o número de dias de ocorrência de velocidades de corrente superiores a 0.2m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.*

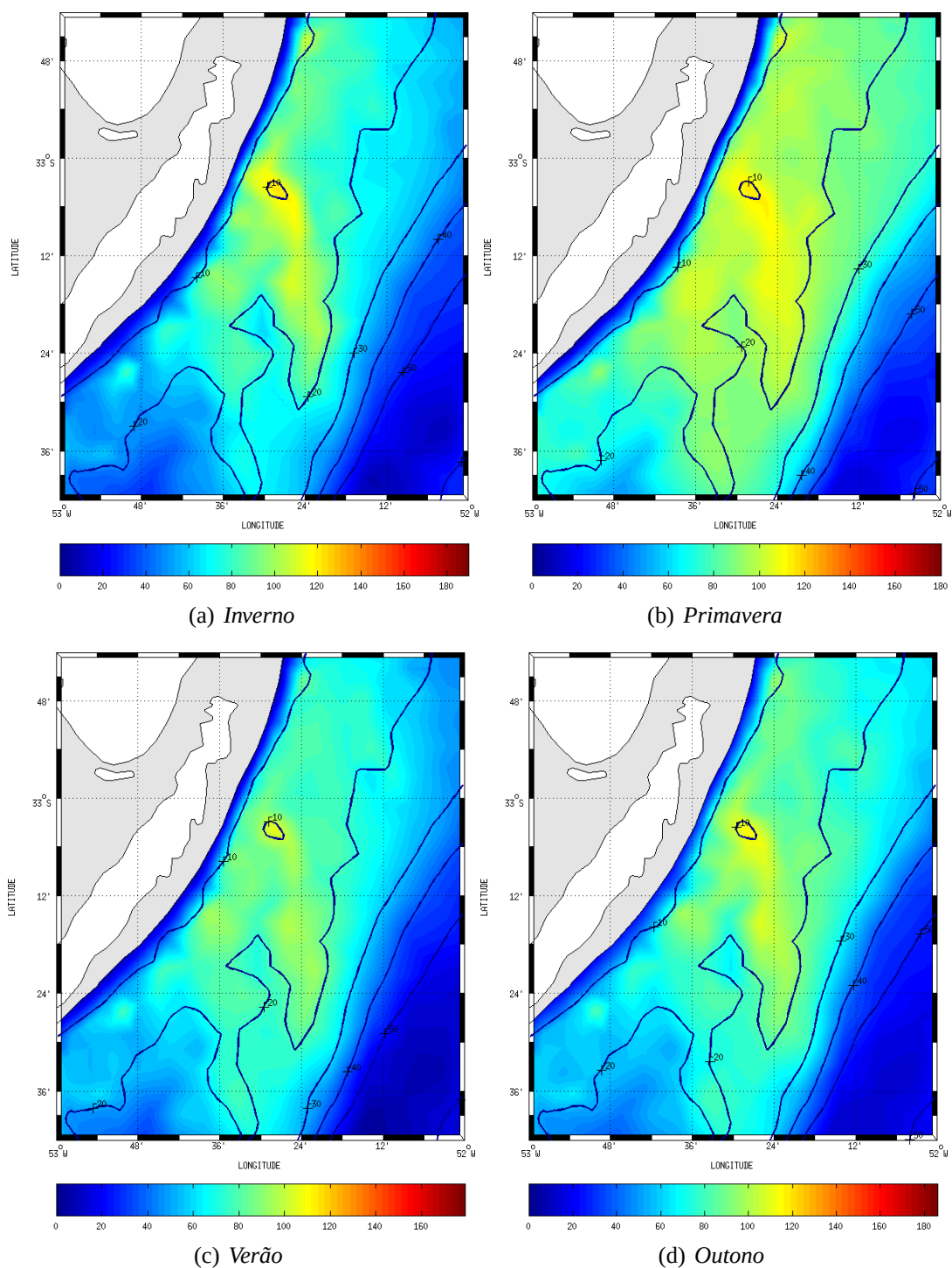


Figura 3.16: Histograma espacial de frequência de acordo com a duração de cada estação do ano para a região sul. A escala de cores representa o número de dia de ocorrência de velocidades de corrente superiores a 0.2m/s. A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.

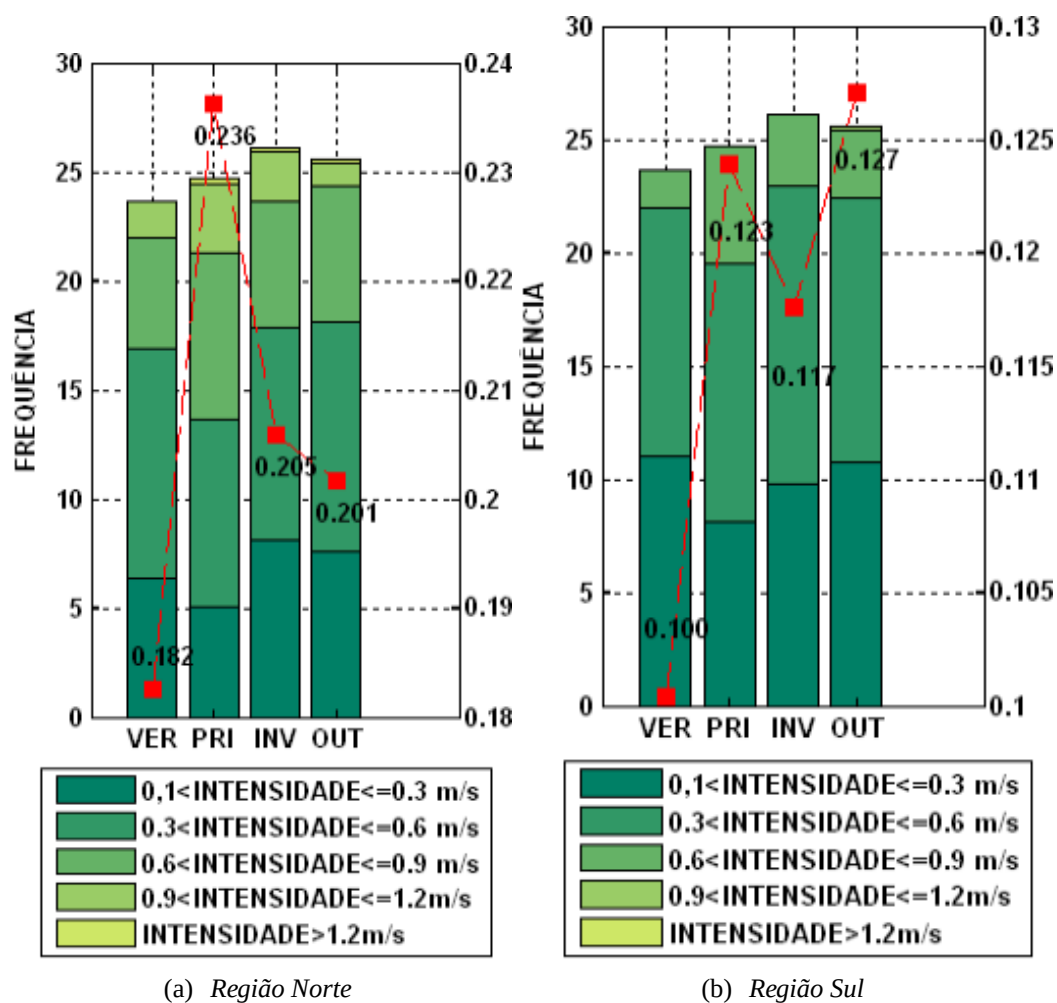


Figura 3.17: Histograma de frequência (%) da intensidade de corrente para as estações do ano. Em vermelho encontra-se o desvio padrão.

A região sul, como visto anteriormente, tem potencial inferior de produção energética quando comparada a da região norte. Entretanto, possui maior estabilidade para a conversão desta energia, por apresentar médias e desvios menores, além de menores variações sazonais. A velocidade média de corrente é mais elevada para a estação da primavera exercendo um alto potencial energético de $5 \pm 8kW /Dia$ e potência integrada em torno de $0.45MW /Ano$.

Desta forma, o histograma de frequência das intensidades de corrente (figuras 3.17 b.) demonstra que a estação da primavera, outono e inverno possuem comportamento semelhante, sendo que somente no outono foram estimadas velocidades superiores a $0.9m/s$. Na primavera foram observadas as maiores frequências (5%) de correntes com intensidade entre 0.6 e $0.9m/s$.

No histograma da frequência de potência (figura 3.18 b.), são observadas as maiores ocorrências de conversão energética, além dos maiores desvios (podendo alcançar $8 \pm 1.41kW$) na estação do outono. Entretanto, podemos observar a grande frequência de baixa produção energética (23% com valores entre 1 e $1.5kW /Dia$), que acarreta um alto desvio padrão, como pode ser observado na figura 3.14 onde a estação do outono apresentou o maior desvio padrão espacialmente observado. A primavera apresenta a maior frequência de média produção (4% com valores entre 4 e $6kW /Dia$) e um desvio padrão relativamente baixo ($1.09kW /Dia$), demonstrando melhores possibilidades de conversão em média para esta região.

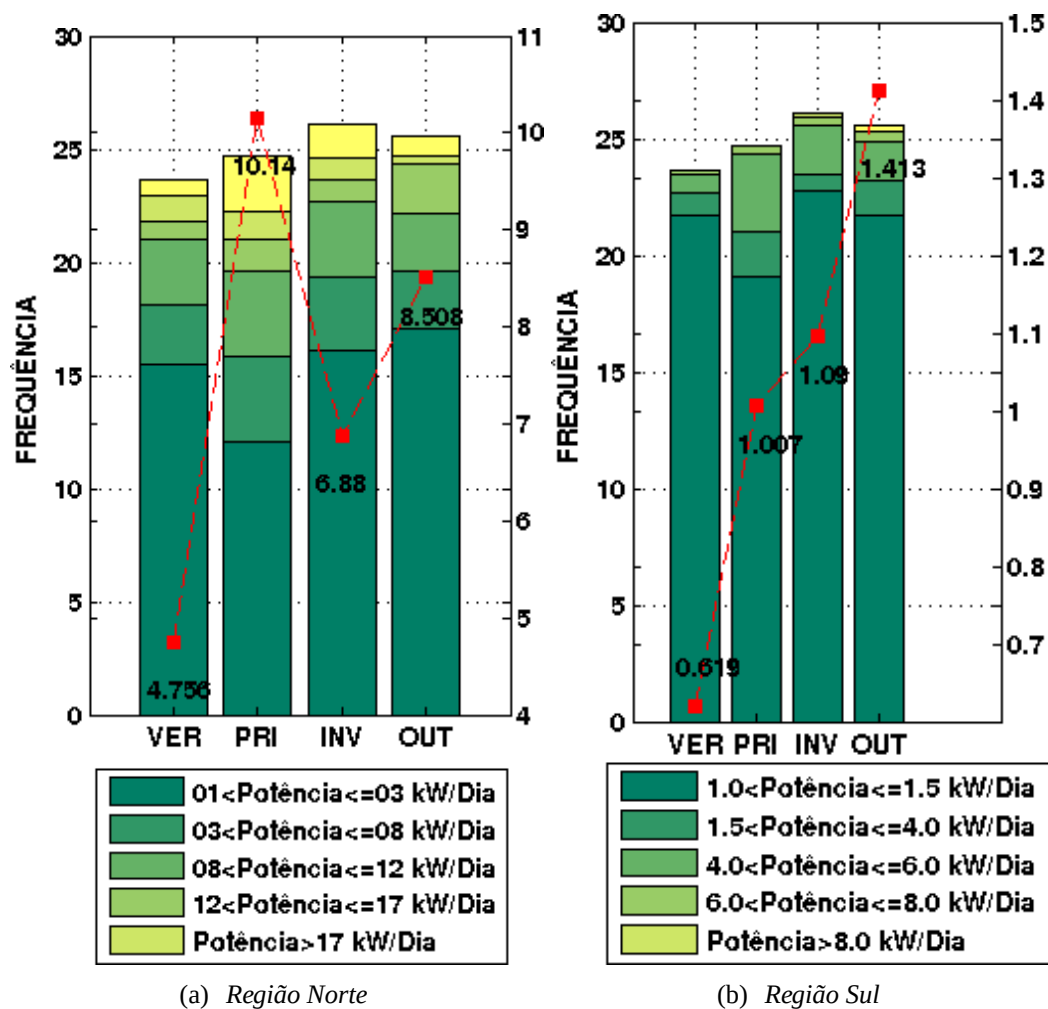


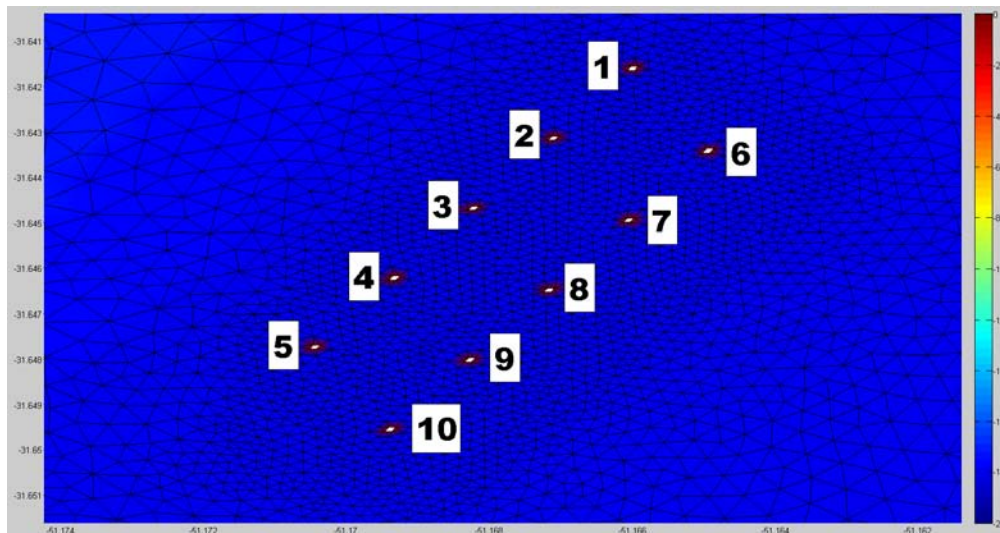
Figura 3.18: Histograma de frequência (%) da potência para as estações do ano. Em vermelho encontra-se o desvio padrão.

3.3 Simulação de Sítios de Conversão

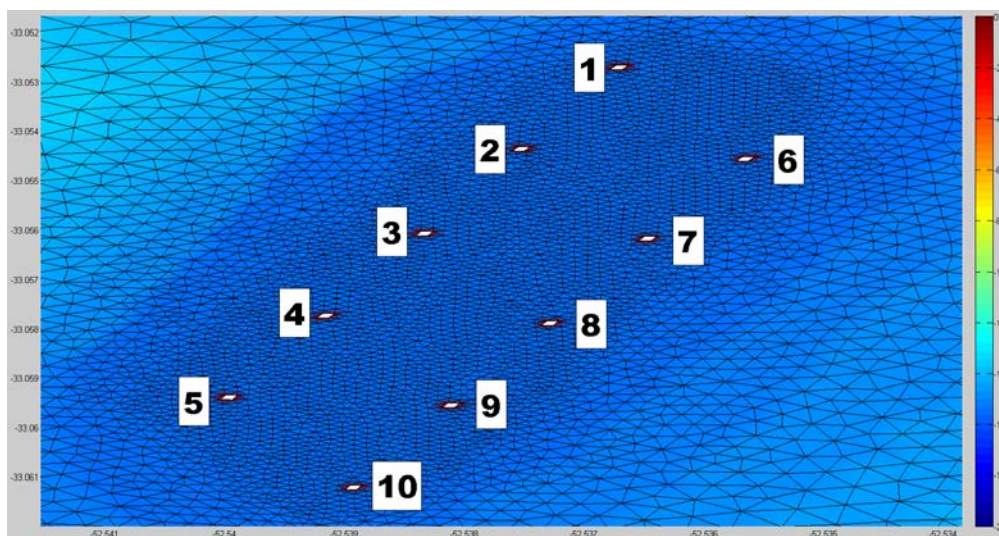
A simulação dos cenários com os sítios de conversão de energia permite a realização de estudos que podem ser utilizados para a otimização da posição dos conversores ou sua estrutura física, de forma, a maximizar a conversão energética. Esta pesquisa não tem o foco de identificar estes tipos de eventos, mas fornecer informações para auxiliar o desenvolvimento de estratégias que possam ser utilizadas como indicadores em estudos futuros.

Para a realização da análise dos sítios de conversão, a metodologia de Marques et al. (2012) foi utilizada com o objetivo de verificar a eficiência da conversão de energia em um sítio de conversores, sendo que também foi considerado o efeito físico da presença do conversor. De forma a simular as alterações da circulação local, o efeito físico da forma dos conversores foi considerado através da utilização de conversores com uma estrutura aproximada ao formato de um poste retangular (figura 2.16), os quais foram colocados ao longo da coluna d'água, desde o fundo até a superfície livre (figura 3.1).

Para as análises dos sítios de conversão, foi adotada uma nomenclatura para cada linha de conversores (figura 3.19). Enquanto que as comparações entre as simulações foram realizadas com as simulações com e sem o efeito de barreira (ver figura 2.10), onde o efeito de barreira é representado pela estrutura em formato cônico desde o fundo marinho até a superfície (figura 3.20). Estas simulações foram tratadas para um período de 330 dias climatológicos.



(a)



(b)

Figura 3.19: Numeração dos conversores e a batimetria referente a cada região. (a) Região Norte. (b) Região Sul.

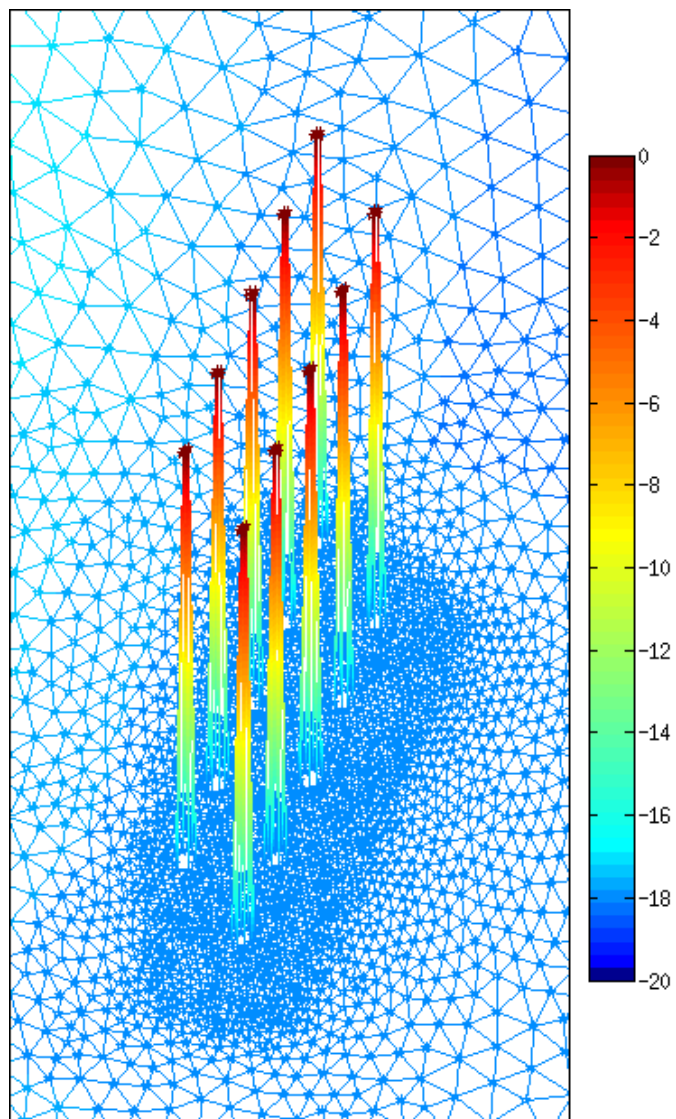


Figura 3.20: *Sítio de conversão de energia com a malha tridimensional utilizada nas simulações da região norte. Esta representação demonstra o efeito físico da barreira imposta nas simulações.*

3.3.1 Análise residual dos conversores

Para definir os conversores mais eficientes em cada sítio de conversão, foram realizadas análises de variabilidade espacial da velocidade no sítio de conversão levando em consideração a sua variação temporal durante a simulação. Estas análises consistem em quantificar os conversores de acordo com sua capacidade de converter a energia das correntes em potência de acordo com os processos hidrodinâmicos decorrentes ao longo da simulação.

O comportamento médio da geração de energia nos sítios de conversão pode ser analisado considerando o campo residual da velocidade das correntes concomitante ao campo médio de potência convertida (apresentado na forma de isolinhas de potência) (figuras 3.21, 3.22, 3.23, 3.24).

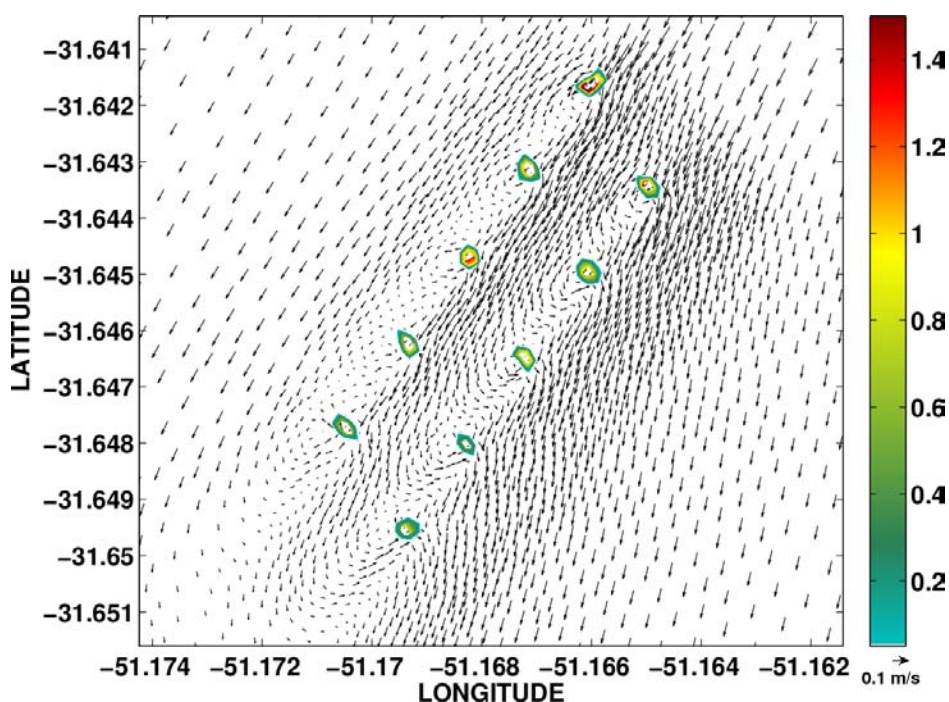


Figura 3.21: *Velocidades residuais da corrente e a potência média gerada pelos conversores (kW) para a região norte sem a presença das barreiras.*

Para a região norte, a média da potência alcança valores superiores a 1.4 kW (figuras 3.21, 3.22) em alguns conversores. Na simulação sem a presença das barreiras (figura 3.21), os conversores 1, 2, 3 e o 6 apresentam maiores valores médios de potência, enquanto que, na simulação com a presença das barreiras (figura 3.22), além dos conversores citados anteriormente, os conversores 7, 8 e o 10 mostram alta capacidade de conversão de energia.

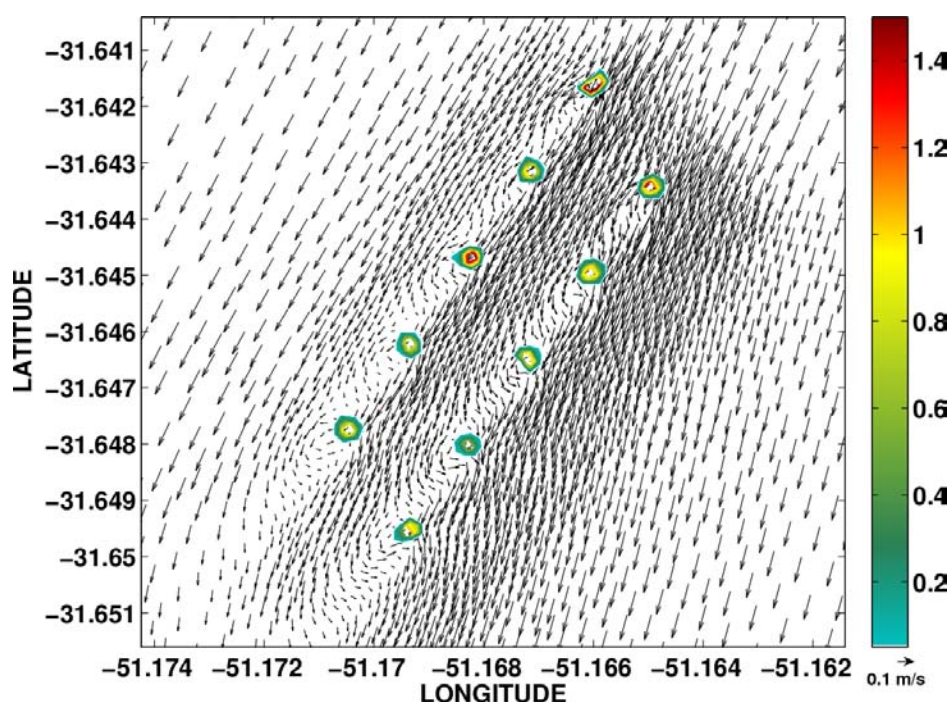


Figura 3.22: Velocidades residuais da corrente e a potência média gerada pelos conversores (kW) para a região norte com a presença das barreiras.

Podemos observar que as simulações apresentam um padrão residual de velocidade de correntes direcionadas para sudoeste, que pode ser explicado pela dominância de ventos de quadrante norte durante o período analisado. Além disso, podemos perceber uma intensificação da velocidade residual de correntes na simulação que considera a presença das barreiras (figura 3.22), onde as velocidades são intensificados na região

entre os conversores e ao redor dos conversores à direita do sítio. Na simulação sem a presença das barreiras (figura 3.21) este efeito não pode ser observado.

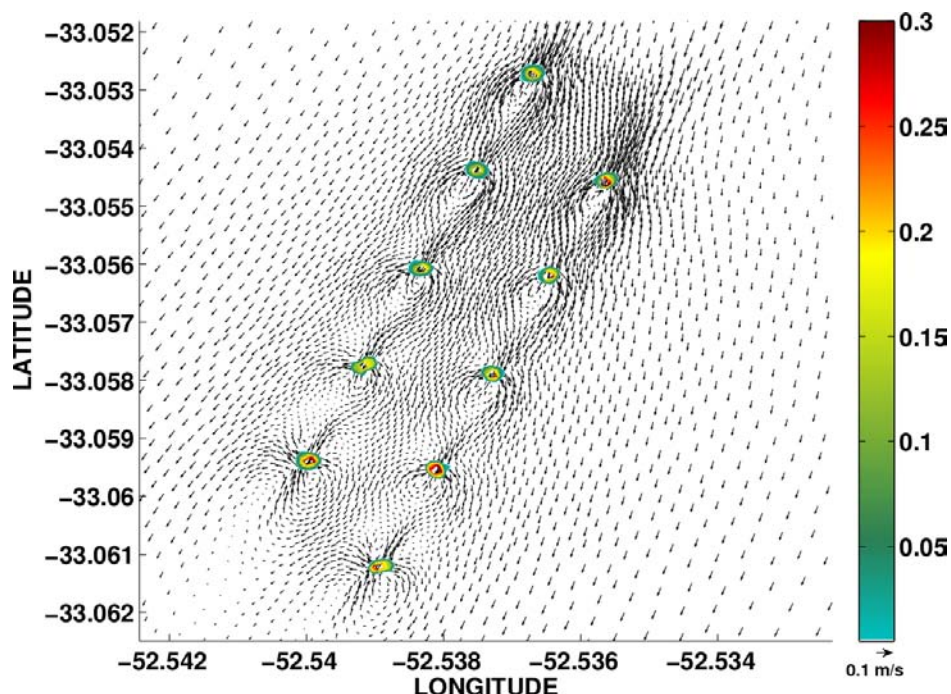


Figura 3.23: *Velocidades residuais da corrente e a potência média gerada pelos conversores (kW) para a região sul sem a presença das barreiras.*

Na região da zona de "sombra" dos conversores é possível ser observado o efeito esteira gerado pelos conversores adjacentes. Na simulação que não considera a presença das barreiras, este efeito é puramente hidrodinâmico, onde a variação do campo de velocidade de correntes devido a conversão de energia gera alterações no padrão de vorticidade local. Por outro lado, nas simulações onde são consideradas as barreiras, este efeito aparece como contribuição das alterações dos processos hidrodinâmicos e do efeito de forma considerado.

Em relação à potência, a região sul apresenta menor capacidade energética, alcançando valores em torno de 0.3 kW (figuras 3.23, 3.24) em alguns conversores. Na

simulação sem a presença da barreira (figura 3.23), os conversores 5, 6, 9 e o 10 apresentam maiores valores médios de potência, enquanto na simulação com a presença das barreiras (figuras 3.24), todos os conversores, da linha à direita, além do 5, apresentam geração média em torno de 0.3 kW.

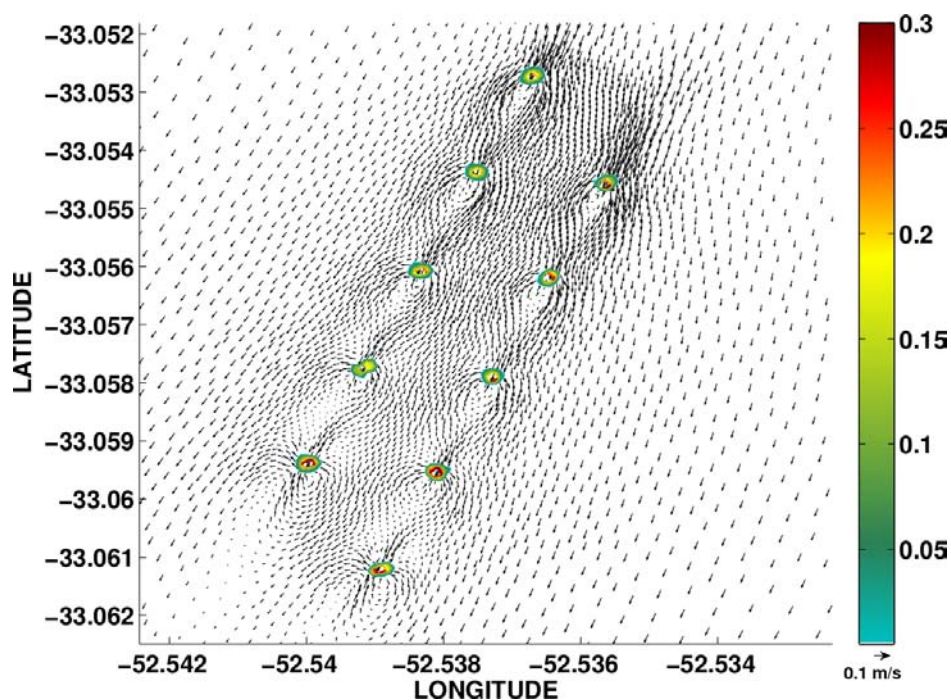


Figura 3.24: *Velocidades residuais da corrente e a potência média gerada pelos conversores (kW) para a região sul com a presença das barreiras.*

Ao se analisar o campo residual da velocidade das correntes, notamos a intensificação da potência convertida na simulação com a presença das barreiras (figuras 3.24) é associada a influência que as mesmas induzem no fluxo local, potencializando a geração de energia.

Além disso, podemos observar nas duas simulações uma intensificação das correntes incidentes nos conversores 1, 2, 6 e 7, e posterior diminuição dos vetores incidentes nos conversores mais ao sul. Este padrão bimodal de intensidades pode ser associado

às intermitentes mudanças de direção das correntes que ocorrem na região sul. Nesta região, é possível ainda perceber uma diminuição no "efeito esteira" que é gerado pelas menores intensidades de correntes incidentes no sítio.

Os conversores menos protegidos com relação ao campo residual das correntes conseguem manter um padrão de conversão de energia com maiores médias. É importante ressaltar que a região norte é capaz de gerar, em média, 4 vezes mais potência do que a região sul.

3.3.2 Análise da Variabilidade Temporal

De forma a analisar a variabilidade temporal entre as simulações *com as barreiras* e *sem as barreiras*, séries temporais da potência gerada pelos conversores foram plotadas para a região norte (figuras 3.25) e região sul (figuras 3.26). As séries temporais são apresentadas em escala logarítmica e representam os conversores mais eficientes de cada sítio. A série temporal da simulação sem o efeito da barreira é apresentada com a linha **preta** e a simulação com o efeito das barreiras é apresentada em **tracejado vermelho**.

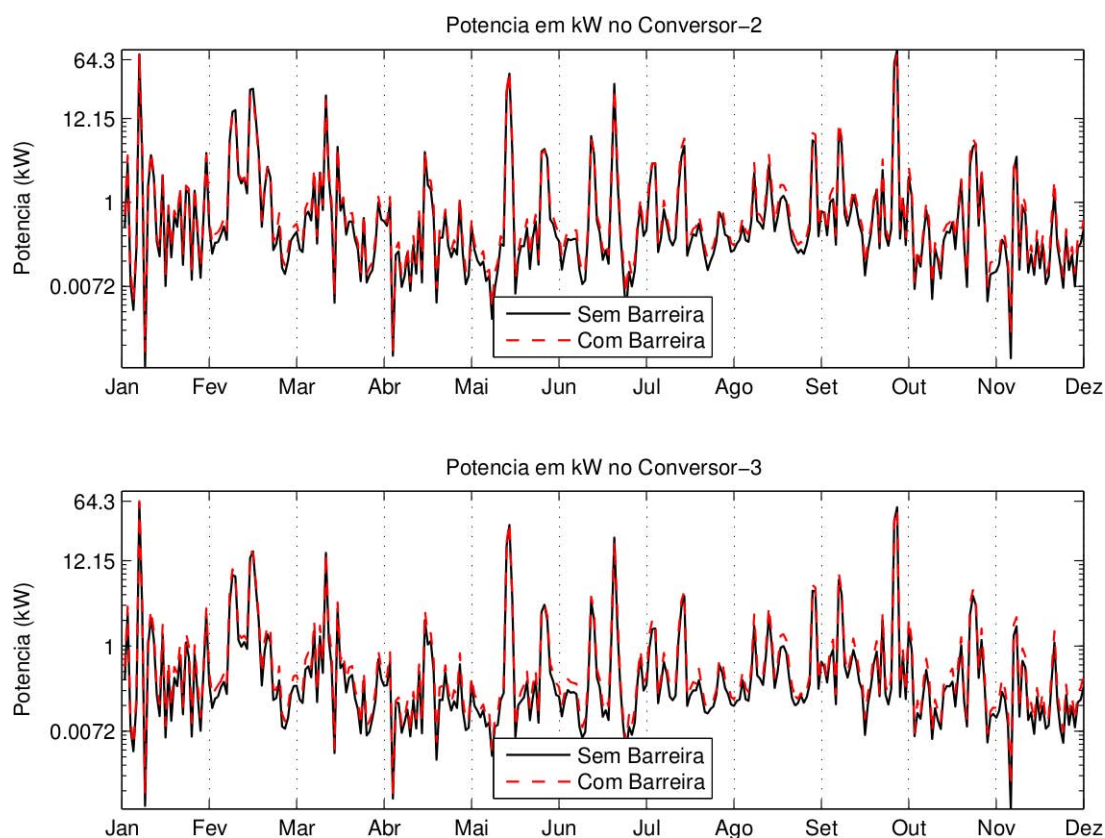


Figura 3.25: Série temporal da potência na região norte (em escala logarítmica). Simulação sem o efeito das barreiras (**Preto**) em comparação com a simulação com o efeito das barreiras (**Tracejado vermelho**).

A região norte (figuras 3.25) apresentou maior potencial energético durante todo

o período de simulação e os conversores 2 e 3 foram escolhidos para demonstrar a variação temporal. Como podemos observar, existe grande similaridade entre as séries temporais da simulação com as barreiras e sem as barreiras, indicando que a presença das barreiras não afeta a temporalidade da geração da energia.

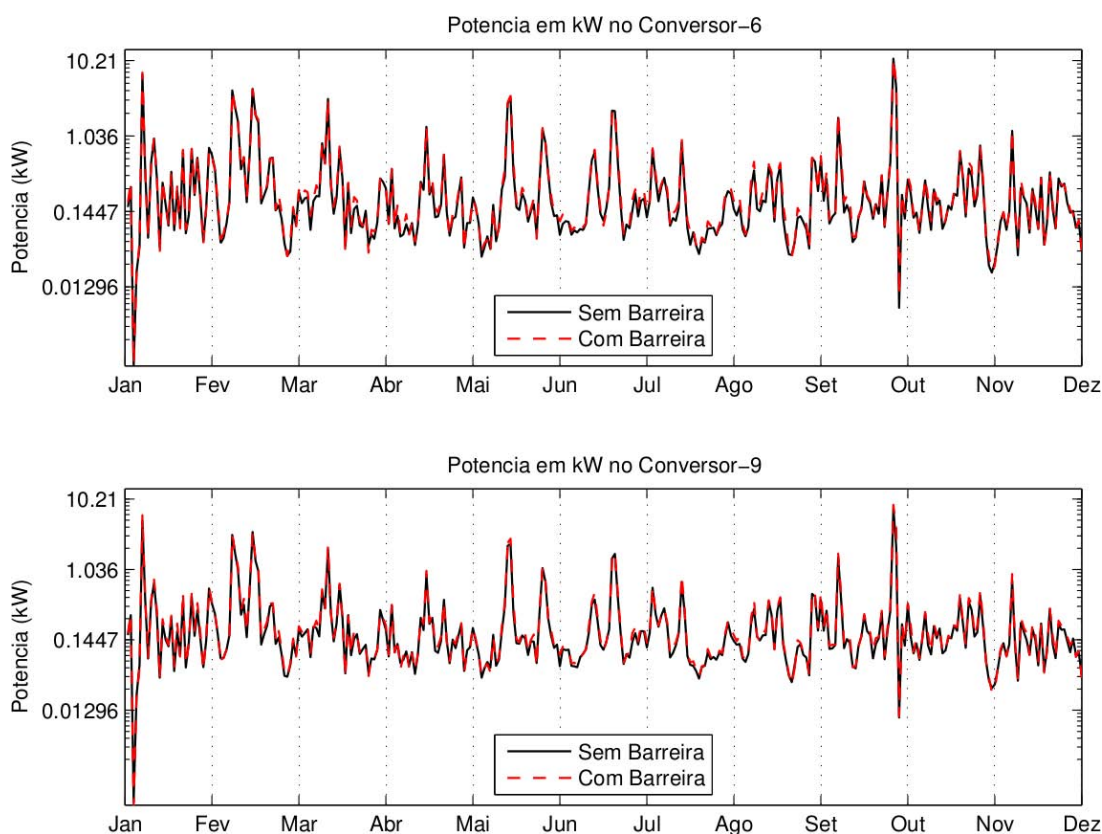


Figura 3.26: *Série temporal da potência na região sul (em escala logarítmica). Simulação sem o efeito da barreira (Preto) em comparação com a simulação com o efeito da barreira (Tracejado vermelho).*

Além disso, podemos observar que em certos momentos a simulação com a presença das barreiras contribui para maior geração de potência nos conversores, resultando em maior eficiência do sítio. O padrão observado nos outros conversores foi semelhante ao apresentado na figura 3.25 e, portanto, não serão apresentados nesta seção.

Para a região sul (figuras 3.26) foi observado uma diferença visual menos significativa devido a menor escala de geração energética deste sítio de conversores. Entretanto, em todos os conversores existem momentos em que a geração da potência é superior na simulação com as barreiras. O padrão de potência dos outros conversores deste sítio se apresentou de forma semelhante e portanto, não serão apresentadas nesta seção.

Podemos observar em todas as séries temporais que a presença das barreiras não induz grandes alterações no padrão temporal da conversão de potência. As alterações são associadas a intensificação da potência convertida. Podemos ainda observar que os eventos de máxima conversão de potência são mantidos.

De forma a analisar a temporalidade da conversão de potência integrada em todo o sítio de conversores, foram aplicados aos dados o método de ondaletas descritos por Torrence and Compo (1997) e Morettin (2004) para gerar o espectro energético local e integrado. Desta forma, a análise de ondaletas é capaz de demonstrar a ocorrência dos eventos de conversão de potência como função do tempo.

As séries temporais de potência integrada para a região norte (figuras 3.27 a. e 3.28 a.) e as séries temporais da intensidade das correntes apresentam correlação direta. Percebemos eventos de alta conversão de energia ocorrendo ao longo de todo o período, entretanto, alguns eventos são mais destacados. Para a simulação sem a consideração das barreiras (figura 3.27 a.), a conversão de potência durante o mês de janeiro alcançou 400 kW, entre maio e junho, outro evento ocorreu, alcançando 250 kW e durante o final de setembro valores de 300 kW são obtidos. Na simulação com a consideração das barreiras (figura 3.28 a.) as ocorrências de conversão de potência se intensificam, entretanto, existe pouca variação na temporalidade dos processos que controlam a conversão de energia.

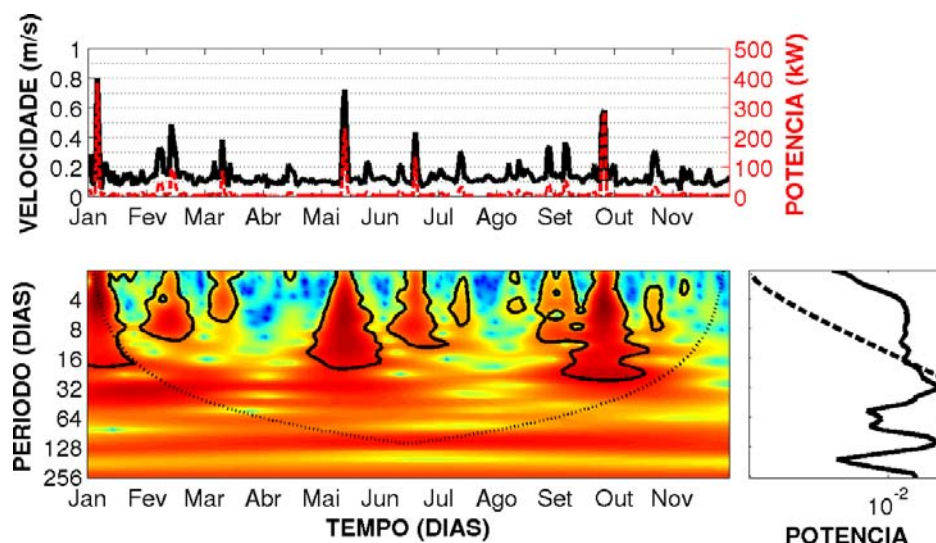


Figura 3.27: Análise da ondaleta para a região norte, **simulação sem barreira**. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente e da potência elétrica utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de energia local. (c) Espectro cruzado de energia global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.

Em relação ao espectro cruzado de energia local (figuras 3.27 b. e 3.28 b.) percebemos que as correlações positivas (tons em vermelho) entre a potência e a intensidade das correntes, ocorrem com os valores de velocidade maiores que 0.5 m/s, ocasionando maior conversão de energia.

É possível observar dois principais grupos de escalas de variabilidade que controlam o comportamento do sítio de conversores com respeito a conversão de potência. No primeiro grupo, períodos menores de 6 dias dominam as ocorrências, provavelmente ocasionados por rápidas alterações no padrão de ventos que influenciam o padrão de circulação das correntes costeiras locais.

Por outro lado, o segundo grupo consiste em correlações cobrindo períodos de até 16 dias, sugerindo relação com a passagem de sistemas meteorológicos e subsequentes

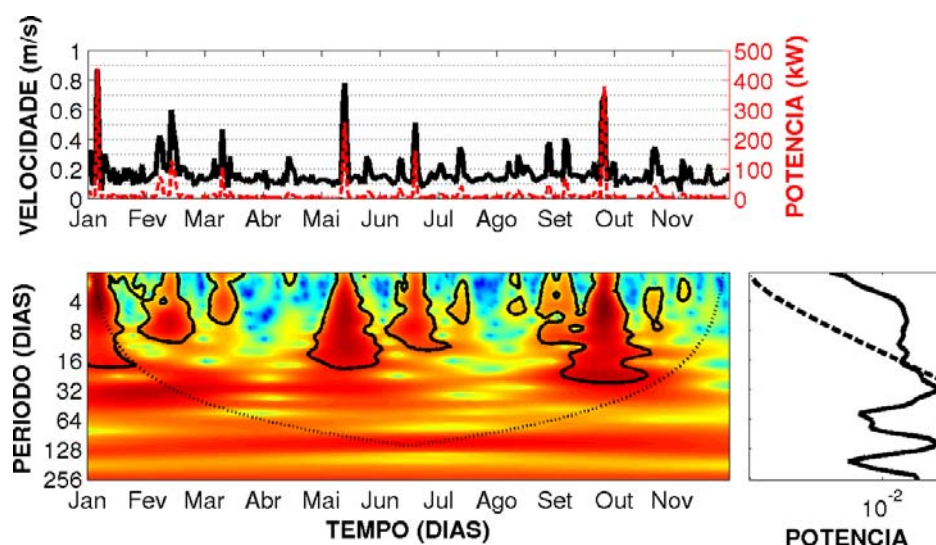


Figura 3.28: Análise da ondaleta para a região norte, **simulação com barreira**. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente e da potência elétrica utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de energia local. (c) Espectro cruzado de energia global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.

alterações na intensidade e direção do vento. Esta afirmativa é corroborada pelos espectros cruzado de energia global (figuras 3.27 c. e 3.28 c.), que ressaltam os períodos de 16 dias como os mais energéticos.

Para a região sul, as séries temporais de potência integrada (figuras 3.29 a. e 3.30 a.) apresentam menores intensidades de corrente e, conseqüentemente, de potência quando comparadas com a região norte. Os máximos de conversão de potência foram observados durante o mês de janeiro e ao final do mês de setembro, resultando em valores em torno de 80 kW (figura 3.30 a.). Apesar da região sul apresentar conversão de energia inferior a região norte, o padrão temporal de variabilidade é mantido.

No espectro local (figuras 3.29 b. e 3.30 b.) e global (figuras 3.29 c. e 3.30 c.) de energia existe uma relação bem definida com grandes correlações entre os eventos de

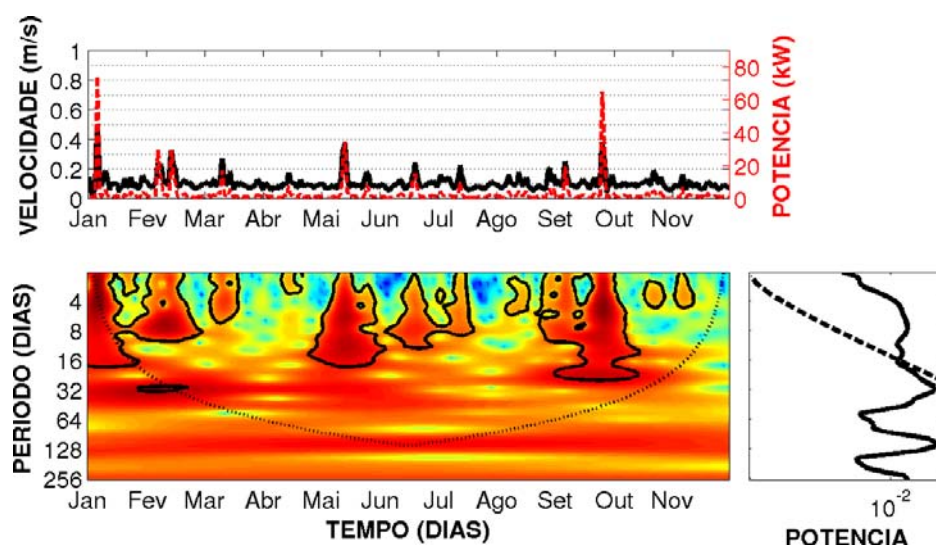


Figura 3.29: Análise da ondaleta para a região sul, **simulação sem barreira**. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente e da potência elétrica utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de potência local. (c) Espectro cruzado de potência global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.

alta conversão de potência ocorrendo ao longo de todo o período simulado, com ciclos entre 8 e 16 dias, que provavelmente podem ser associados a passagem de sistemas meteorológicos.

Na tabela 3.2 podemos observar com maior clareza as informações contidas nas séries temporais. Para a região norte podemos perceber as diferenças entre as simulações ao observar as médias e os máximos de potência obtida pelos conversores. Na simulação sem as barreiras, os conversores 1, 2 e 3 são os mais energéticos. Já na simulação com as barreiras, existe uma maior homogeneidade entre a geração energética onde os conversores 1, 2, 3, 6 e 7 apresentam as maiores médias e consequentemente os máximos.

Na região sul o mesmo padrão é esperado, onde praticamente todas as médias e

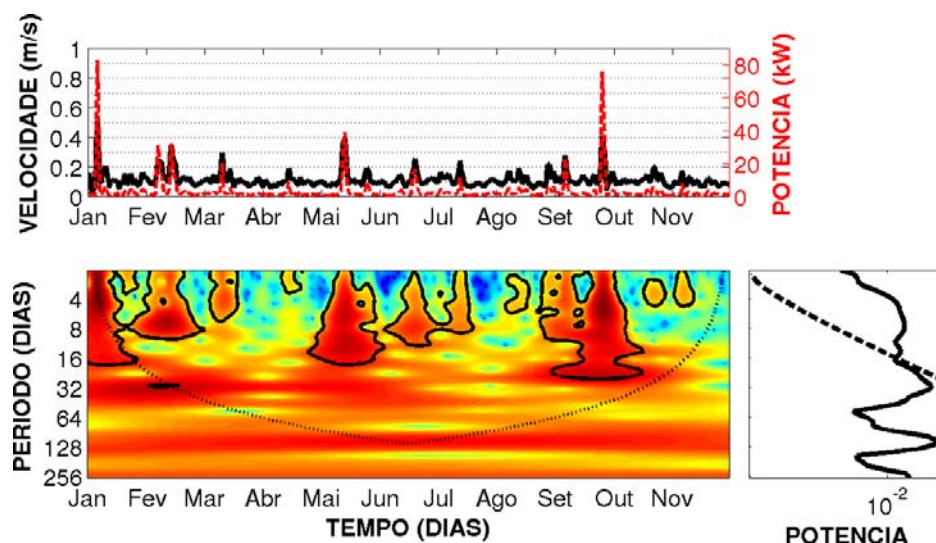


Figura 3.30: Análise da ondaleta para a região sul, **simulação com barreira**. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente e da potência elétrica utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de energia local. (c) Espectro cruzado de energia global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.

máximos da simulação com as barreiras são superiores às observadas para a simulação sem as barreiras (exceto nos máximos dos conversores 1 e 5). O sítio da região norte com a presença das barreiras apresentou potência integrada 23% superior quando comparada a simulação sem a presença das barreiras. Para a região sul, as barreiras potencializaram em 13% a conversão de potência integrada.

A presença das barreiras demonstrou influenciar positivamente a eficiência dos geradores. Sendo assim, estimou-se que o sítio da região norte foi capaz de converter 4,12 MW durante os 330 dias de simulação, enquanto que o sítio da região sul converteu uma quantidade de potência inferior, cerca de 0.94 MW. Desta forma, podemos inferir que os conversores 1 e 6 no sítio da região norte são os mais energéticos, enquanto na região sul, todos conversores apresentam maior regularidade na conversão da potência.

Tabela 3.2: Potência (kW) gerada pelos conversores. Méd= Média; Máx= Máximo; Desv= Desvio Padrão; Int= Integrado.

Região	Conversor	Simulação sem Barreira				Simulação com Barreira			
		Méd.	Máx.	Desv.	Int.	Méd.	Máx.	Desv.	Int.
N	1	1,87	65,68	6,34	617,01	1,93	59,40	5,97	636,54
	2	1,29	47,48	4,45	424,19	1,44	50,07	4,54	476,70
O	3	1,20	46,58	4,18	394,99	1,54	54,18	5,01	509,49
	4	0,80	29,33	2,91	262,37	1,08	36,85	3,50	355,03
R	5	0,56	25,28	1,98	183,41	1,00	38,42	3,32	330,01
	6	1,03	35,65	3,48	339,99	1,42	46,21	4,54	469,23
T	7	0,93	42,31	3,38	305,70	1,39	48,38	4,60	458,84
	8	0,90	43,56	3,28	297,55	1,10	38,18	3,67	362,49
E	9	0,43	25,18	1,83	142,84	0,67	30,80	2,49	221,69
	10	0,62	32,30	2,39	204,46	0,92	37,49	3,00	303,75
	Sítio	0,96	39,34	3,42	3172,51	1,25	44,00	4,06	4123,77
Região	Conversor	Méd.	Máx.	Desv.	Int.	Méd.	Máx.	Desv.	Int.
S	1	0,21	8,39	0,64	69,39	0,23	8,06	0,63	77,18
	2	0,18	5,65	0,48	59,31	0,24	7,39	0,62	78,10
	3	0,18	4,97	0,50	59,93	0,25	7,60	0,69	82,85
	4	0,22	8,11	0,63	71,08	0,23	7,62	0,65	74,51
U	5	0,32	13,99	1,00	104,04	0,34	13,22	0,99	112,62
	6	0,32	10,64	0,87	106,90	0,34	10,69	0,89	113,04
	7	0,25	7,40	0,61	81,36	0,28	8,29	0,70	90,88
	8	0,26	7,55	0,71	85,50	0,31	8,91	0,85	102,34
L	9	0,30	11,08	0,86	99,64	0,34	12,23	0,95	112,77
	10	0,26	11,59	0,80	84,47	0,31	12,54	0,90	101,44
	Sítio	0,25	8,94	0,71	821,62	0,29	9,66	0,79	945,73

3.3.3 Análise da Variabilidade Espacial

De forma a definir a importância de cada conversor na estrutura do sítio, foram calculadas as correlações entre a velocidade das correntes incidentes e a potência convertida ao longo de toda a linha dos conversores. Assim, a eficiência dos conversores (ver figura 3.19) foi analisada em diferentes escalas de tempo pela aplicação da análise espectral cruzada bidimensional de ondaletas. As análises foram realizadas considerando que os processos dominantes possuem escalas temporais maiores que 1 dia e menores do que 30 dias.

As figuras a seguir (figuras 3.31, 3.32, 3.33, 3.34), serão analisadas de acordo com a ordem apresentada para os conversores na figura 3.19. A importância de cada conversor e sua variação no tempo será definida pela alta correlação (tons em vermelho) apresentada pela utilização da ondaleta de Morlet. Inicialmente analisaremos a região norte e as variações de potência geradas devido a presença ou ausência das barreiras (figuras 3.31, 3.32,).

Analisando o espectro cruzado da velocidade das correntes incidentes e da potência convertida (figura 3.31 a.) no cenário sem a presença das barreiras, percebemos que existem 4 eventos mais significativos de conversão energética. Entretanto, esta maior conversão ocorre de forma mais significativa nos conversores 1 e 2. No evento de Outubro, os quatro primeiros conversores são capazes de remover energia das correntes de forma eficiente, convertendo cerca de 30 kW.

Os conversores restantes são menos significativos em relação ao restante do sítio de conversão, quando são consideradas estas escalas temporais e a alta variância média, de aproximadamente 7 kW, que está associado aos picos de potência dos primeiros

conversores.

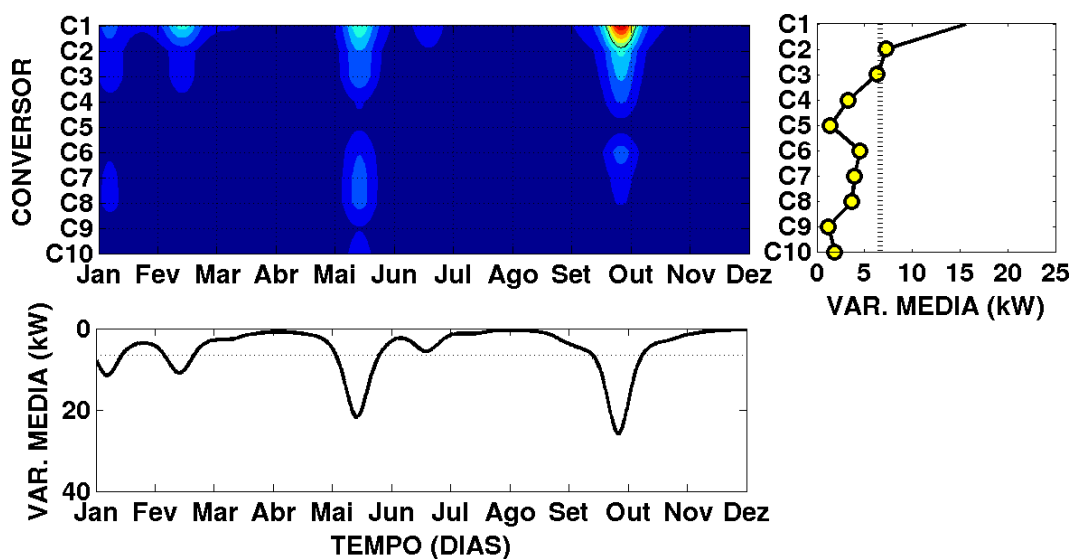


Figura 3.31: Análise espectral cruzada para eventos de escala temporal maiores que 1 dias e menores que 30 dias, entre as séries temporais de potência (kW) e velocidade de corrente (m/s) na região norte para a **simulação sem barreira** (a). Variância média da análise ao longo de todo o tempo, onde os valores abaixo da reta tracejada possuem nível de confiança de 95 % (b) e série temporal da variância espacial média da análise ao longo de todos os conversores (c).

A série temporal de variância média da análise apresentada (figura 3.31 b.) indica, com 95% de confiança sobre os valores que estão abaixo da linha de tendência, que existem 4 eventos de ótimo potencial energético, onde são observadas as maiores correlações. A variância média integrada ao longo da linha de conversores durante todo o tempo de estudo (figura 3.31 c.) indica que, em ciclos de variabilidade de 1 a 30 dias, a maior correlação entre as variáveis ocorre com potência superior 7 kW.

Valores à direita da linha de tendência indicam com 95% de confiança, que sem a presença das barreiras, os conversores 1 e 2 são os mais significativos para a conversão de potência dentro do sítio analisado. Os outros conversores apresentaram variância inferior a variância média e desta forma, demonstraram ser menos eficientes, quando

comparados aos conversores 1 e 2 no sítio da região norte.

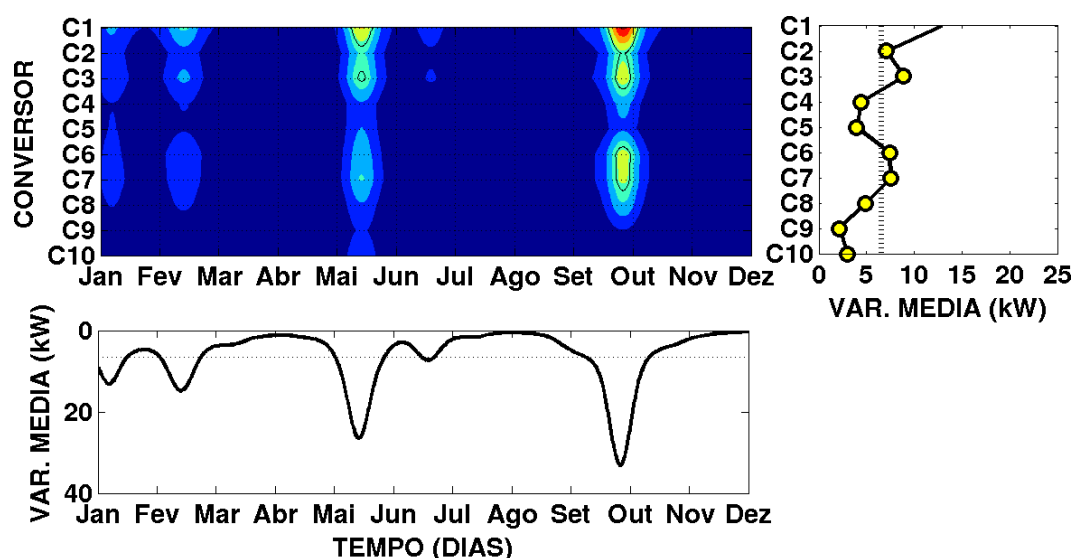


Figura 3.32: *Análise espectral cruzada para eventos de escala temporal maiores que 1 dias e menores que 30 dias, entre as séries temporais de potência (kW) e velocidade de corrente (m/s) na região norte para a **simulação com a barreira** (a). Variância média da análise ao longo de todo o tempo, onde os valores abaixo da reta tracejada possuem nível de confiança de 95 % (b) e série temporal da variância espacial média da análise ao longo de todos os conversores (c).*

Como podemos analisar na figura 3.31, existe um padrão de eventos mais significativos do ponto de vista da conversão energética. Estes eventos serão tratados a partir de agora como: **Evento A**, correspondente ao pico de Janeiro; **Evento B**, correspondente ao momento de média geração entre Fevereiro e Março; **Evento C**, correspondente ao evento que ocorreu durante o mês de Maio; **Evento D**, correspondente ao último pico de conversão energética ao final do mês de Setembro.

Para a simulação com a presença das barreiras, através do espectro cruzado (figura 3.32 a.), percebemos uma intensificação na conversão de potência durante os principais eventos e um maior número de conversores dentro deste sítio. A série temporal de variância média (figura 3.32 b.), indica com 95% de confiança sobre os valores que

estão abaixo da linha de tendência, que os 4 eventos de ótimo potencial energético se mantêm e são intensificados neste cenário.

Percebemos valores de variância superiores a 35 kW, e quando comparados aos eventos do cenário anterior (figura 3.31 b.), percebemos a maior capacidade de conversão energética para o cenário com a presença das barreiras. A variância média ao longo dos conversores em todo o período de estudo (figura 3.32 c.) indica que a maior correlação entre as variáveis se mantém com gerações médias maiores que 7 kW. Porém, estes resultados sugerem que os conversores 1, 2, 3, 6 e 7 são os mais eficientes do ponto de vista da conversão energética, para o sítio da região norte, quando consideramos a presença das barreiras.

A região sul, possui um potencial energético inferior ao da região norte, entretanto, as variações de potência convertida devido a presença ou não das barreiras (figuras 3.33, 3.34) também serão abordadas a fim de definir os conversores mais eficientes dentro do sítio de conversão.

O espectro cruzado de energia para a simulação sem a presença das barreiras (figura 3.33 a.) indicam um padrão de correlação diferenciado do visto anteriormente para a região norte, onde os conversores 7, 8 e 9 apresentam maior significância.

De acordo com a série temporal de variância média (figura 3.33 b.) percebemos que os mesmos eventos de ótimo potencial energético ocorrem, entretanto, os valores de potência gerada são inferiores ao sítio da região norte. A variância média ocorre em torno de 0.20 kW ao longo do período simulado, enquanto que, o máximo observado durante o **Evento D** é de 0.75 kW.

A variância média ao longo dos conversores em todo o período de estudo (figura

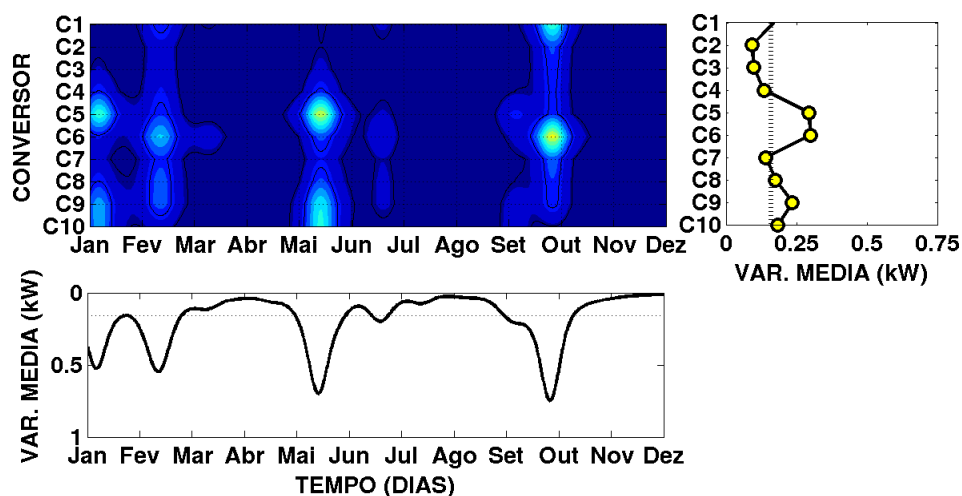


Figura 3.33: Análise espectral cruzada para eventos de escala temporal maiores que 1 dias e menores que 30 dias, entre as séries temporais de potência (kW) e velocidade de corrente (m/s) na região sul para a **simulação sem barreira** (a). Variância média da análise ao longo de todo o tempo, onde os valores abaixo da reta tracejada possuem nível de confiança de 95 % (b) e série temporal da variância espacial média da análise ao longo de todos os conversores (c).

3.33 c.) demonstra que os conversores 1, 5, 6, 8, 9 e 10 são os mais eficientes para o sítio da região sul. Este resultado sugere que a região sul, apesar de possuir menor potencial energético, possui maior estabilidade e capacidade de manter a conversão de energia durante o período estudado. Estas condições indicam um sítio de conversão de energia mais otimizado quando relacionamos a sua geometria ao padrão de correntes da região.

Para a simulação com a presença das barreiras, o espectro cruzado de energia (figura 3.34 a.) indica um padrão de correlação similar ao visto anteriormente na região sul (figura 3.33 b.), entretanto, pequenos aumentos na correlação são observados. De acordo com a série temporal de variância média (figura 3.34 b.), percebemos que os valores de potência convertida são superiores aos da simulação sem o efeito das barreiras. A variância média gira em torno de 0.25 kW enquanto que o máximo observado durante o

Evento D é de 1.0 kW.

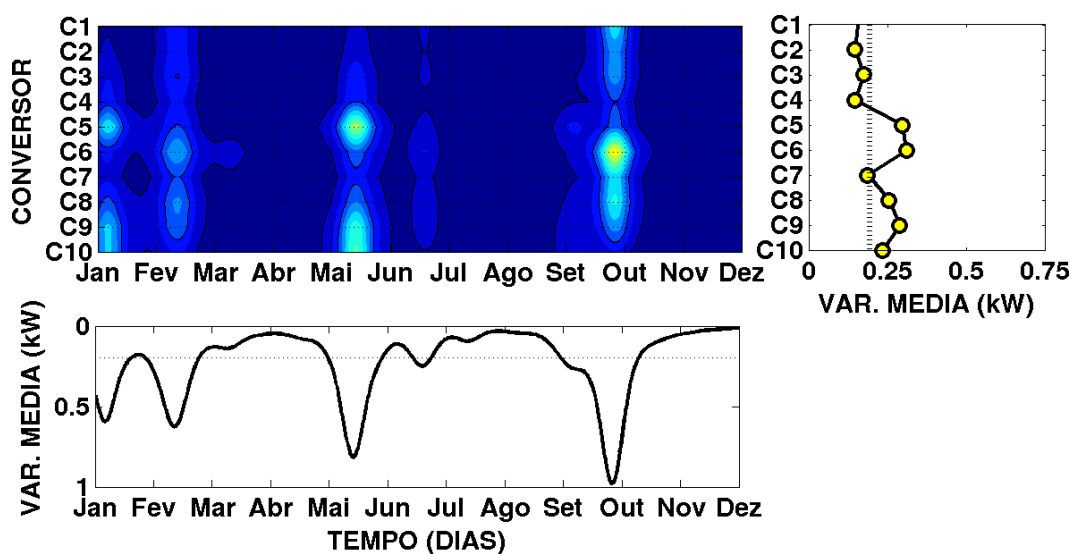


Figura 3.34: Análise espectral cruzada para eventos de escala temporal maiores que 1 dias e menores que 30 dias, entre as séries temporais de potência (kW) e velocidade de corrente (m/s) na região sul para a **simulação com a barreira** (a). Variância média da análise ao longo de todo o tempo, onde os valores abaixo da reta tracejada possuem nível de confiança de 95 % (b) e série temporal da variância espacial média da análise ao longo de todos os conversores (c).

A variância média ao longo dos conversores em todo o período de estudo (figura 3.34 c.) demonstra que somente os quatro primeiros conversores apresentam eficiência menos significativa do ponto de vista da conversão energética para o sítio da região sul. Este resultado sugere que a simulação com a presença das barreiras, intensifica a potencia nos conversores, melhorando a sua eficiência de maneira geral.

3.3.4 Eventos de alta conversão de energia

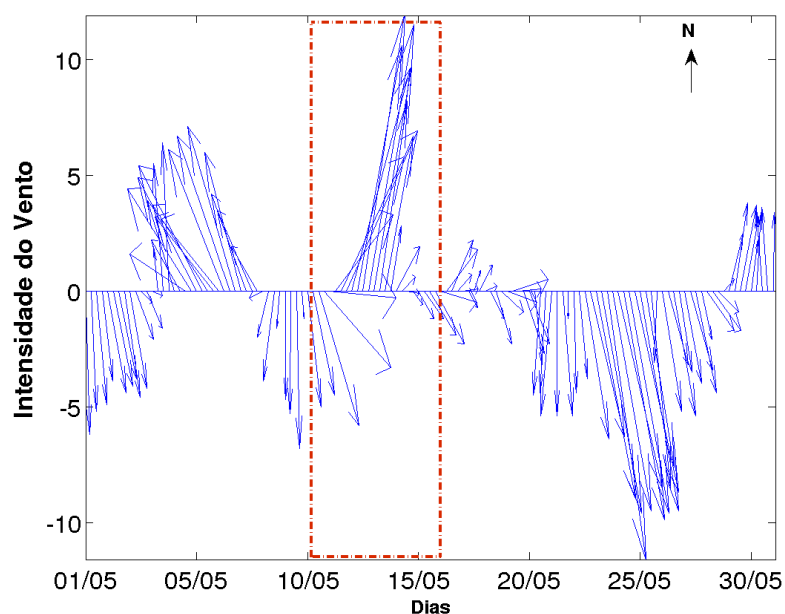
Os resultados anteriores (figuras 3.31, 3.32, 3.33, 3.34), sugerem que existe um padrão de eventos mais significativos do ponto de vista da conversão energética. As séries temporais de variância demonstram quatro eventos mais significativos ocorrendo ao longo do ano.

De forma a analisar o padrão de ocorrência dos eventos de alto potencial energético, foram selecionados os dois eventos mais significativos. O evento que ocorreu durante o mês de Maio e o evento que ocorreu no final do mês de setembro. Estes eventos serão denominados de evento **I** e **II**, respectivamente. Neste sentido, séries temporais da intensidade e direção dos ventos são apresentadas de forma a identificar eventos de alta conversão energética.

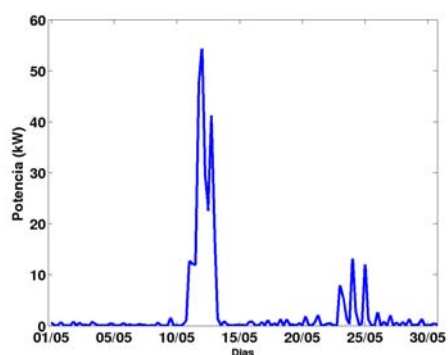
O comportamento do vento demonstra grande variação em sua direção, com constantes trocas do quadrante norte para o sul, durante o mês de Maio (figura 3.35 a.). Os ventos de quadrante norte (dia 10 de Maio) alteram a sua direção de forma intensa para o quadrante sul, com ventos de sudeste de alta intensidade.

Este evento (**I**) promove alto potencial (figura 3.35 b. e c.), em torno de 55 kW, no conversor 1 (*região norte*). Por outro lado, na região sul (conversor 5), ocorre conversão de energia para o mesmo evento, em escala inferior. A subsequente reversão deste vento de sudeste para o quadrante norte (ventos de noroeste) promovem leves picos de potência no dia 25 de Maio. Este evento de conversão de energia é menos intenso devido a menor intensidade dos ventos, com média de 5 m/s.

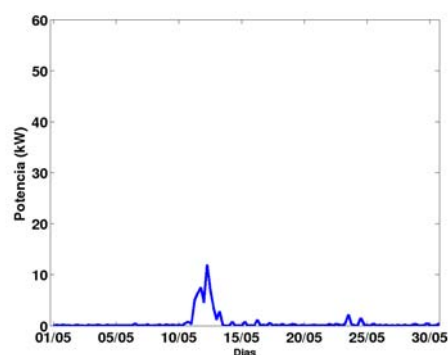
Durante o evento **II**, foi observado um padrão diferenciado para os ventos (figura 3.36 a.) durante o período escolhido (entre 15 de Setembro e 15 de Outubro). Durante



(a) Comportamento do Vento (01/05-31/05)



(b) Conversor 1 - Norte



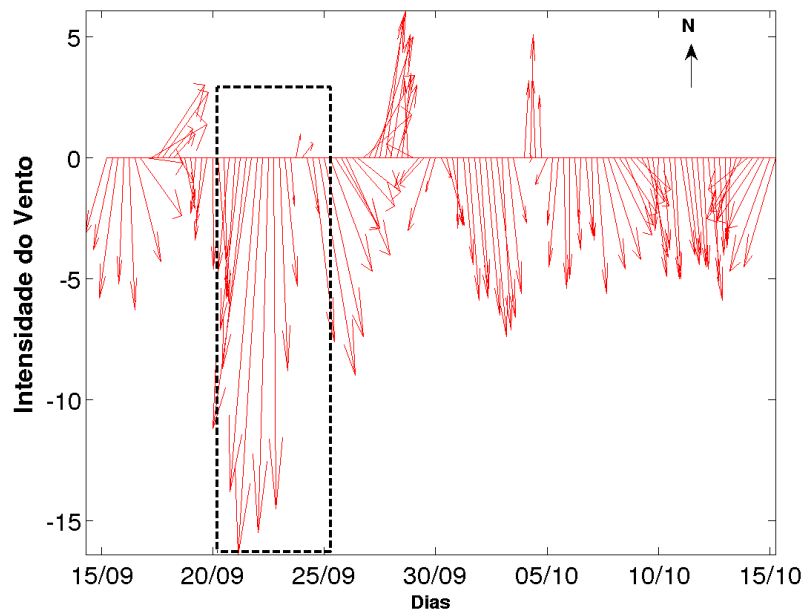
(c) Conversor 5 - Sul

Figura 3.35: Evento extremo **I** em Maio. (a) Comportamento do vento (m/s) durante o evento, o retângulo tracejado indica o momento da alta geração energética observado nos sítios. (b) Série temporal da potência no conversor 1 na região norte. (c) Série temporal da potência no conversor 5 na região sul.

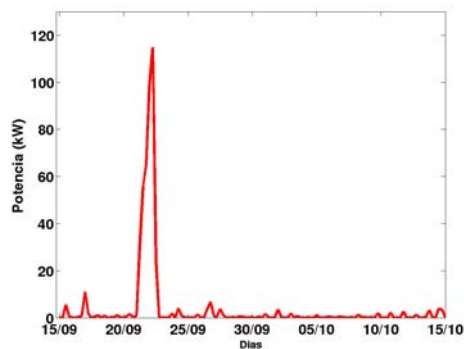
este período, houve predominância de ventos do quadrante sul que foram intensificados entre os dias 20 e 25 de setembro.

Neste período, foram observados valores extremos de potência na região norte, com produção de 120 kW (figura 3.36 b.). Os ventos de quadrante norte observados anteriormente no evento **I** não foram tão significativos com relação a conversão energética, quando comparados ao observado no evento **II**.

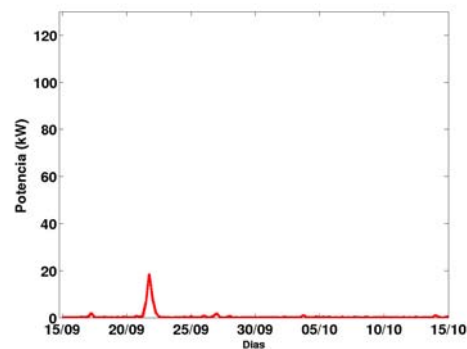
Provavelmente, este fato pode estar associado a maior intensidade dos ventos ocorridos neste evento, além da direção predominante de norte. Estas condições podem induzir correntes de maiores intensidades, que podem ser mais favoráveis a conversão de energia, de acordo com: a geometria e posicionamento do sítio de conversores ao longo da costa.



(a) Comportamento do Vento (15/09-15/10)



(b) Conversor 1 - Norte



(c) Conversor 5 - Sul

Figura 3.36: Evento extremo **II** em Setembro e Outubro. (a) Comportamento do vento (m/s) durante o evento, o retângulo tracejado indica o momento da alta geração energética observado nos sítios. (b) Série temporal da potência no conversor 1 na região norte. (c) Série temporal da potência no conversor 5 na região sul.

Capítulo 4

Discussão

4.1 Viabilidade da Instalação na Plataforma Continental Sul do Brasil

A região da Plataforma Continental do Sul do Brasil apresenta duas regiões que podem ser consideradas como mais propícias a conversão de energia das correntes em energia elétrica. Em escalas sinóticas de tempo, estas regiões têm seu padrão de variabilidade da circulação dirigidas pela ação dos ventos. Ao mesmo tempo em que estas regiões são propícias à conversão de energia elétrica, as mesmas também podem passar por períodos de baixa conversão.

A caracterização morfológica da plataforma continental interna do Rio Grande do Sul foi descrita por Pimenta (1999) e apresenta duas divisões principais: a primeira, em regiões com relevo submarino monótono, suave, plano e homogêneo, e a segunda, com o relevo submarino complexo e com a presença de bancos lineares e depressões. da Silva (2008) demonstrou que a *região norte* deste trabalho é denotada como uma

região complexa seguida de um relevo plano presente ao norte de Solidão.

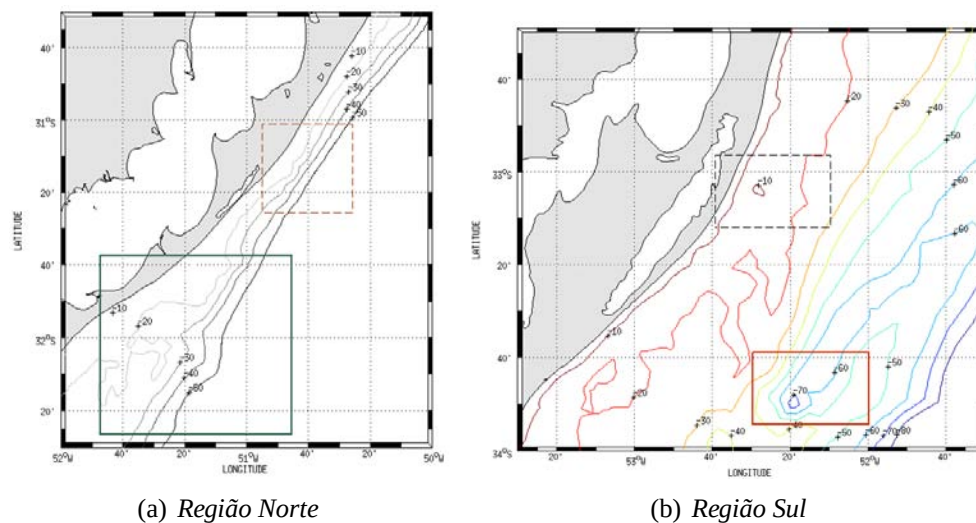


Figura 4.1: Gráficos demonstrando as regiões de interesse dentro da plataforma continental interna do Rio Grande do Sul. Em destaque a diferenciação da declividade batimétrica da região norte (a). Em linha tracejada (b) encontra-se o banco do albardão, enquanto que no quadrado de linha sólido encontra-se a fossa do Albardão. As isolinhas representam batimetria.

Esta região apresenta a isóbata de 50m (limite da plataforma continental interna - figura 4.1 a) mais próxima da linha de costa, que possui uma maior declividade. Em direção ao Farol da Conceição, onde esta isóbata se afasta da costa (figura 4.1 a), o gradiente vertical é reduzido.

Sendo assim, o padrão de circulação é alterado quando as correntes passam de uma região com as isóbatas de 50m próximo a costa, onde o jato costeiro é mais intenso e concentrado, e encontram uma região mais rasa em torno de 20m, e mais afastada da costa. O padrão de circulação é alterado de forma inversa quando as correntes são direcionadas para o norte. Quando este processo ocorre, de acordo com a direção dominante das correntes o jato perde velocidade e se espalha (ganha velocidade e se comprime), respectivamente.

Na *região norte*, além de ocorrer esta alteração na intensidade das correntes associada aos efeitos do estreitamento da plataforma continental, também ocorre uma intensificação quando a corrente na isóbata de 20m encontra um estrangulamento topográfico. Nesta região ocorre um desvio da corrente para uma região mais profunda, em torno de 30m, com subsequente aumento da velocidade.

A *região sul* também se caracteriza pela definição de região complexa, pois esta região apresenta expressiva presença de bancos lineares, como o Banco do Albardão - observado na figura 3.3. Esta região apresenta também uma grande depressão, o "Poço do Albardão" com 75m de profundidade (figura 4.1 b - linha demarcada em traço sólido vermelho).

Nesta região, a corrente costeira dirigida ao longo da isóbata de 20m encontra o Banco do Albardão como barreira, e o fluxo sofre divergência e consequentemente intensificação em seu meandramento. Este padrão de circulação sugere que a intensificação da potência nesta região pode ser fortemente induzida pela topografia irregular de fundo.

Análises estatísticas indicam com 95% de confiança que a ocorrência de processos com escalas temporais menores que 16 *dias*, os quais ocorrem durante todo o período de estudo, controlam o padrão de circulação da região. Diversos autores (Costa and Moller, 2011; Piola et al., 2005; Fernandes et al., 2002; Ciotti et al., 1995) verificaram que o padrão de circulação das correntes costeiras, é fortemente influenciados pela passagem de sistemas meteorológicos e alterações na intensidade e direção dos ventos na região de estudo (Marques, 2009; Marques et al., 2010b,a, 2012).

4.2 Sazonalidade

As regiões norte e sul, analisadas neste trabalho, são as mais propícias para conversão da energia das correntes em energia elétrica. Entretanto, as variações sazonais que ocorrem no padrão de circulação atmosférica, podem aumentar ou diminuir o potencial energético das regiões analisadas.

Os ventos predominantes na costa do Rio Grande do Sul são predominantemente de origem Nordeste e estão associados ao centro de alta pressão gerado pelo anticiclone semi-estacionário do Atlântico Sul. Este sistema é mais intenso entre a Primavera e Verão e mais fraco no Inverno, quando o anticiclone se desloca para zonas de baixa latitude (Möller et al., 2008; Piola et al., 2005; Guerrero et al., 1997).

Este centro de alta pressão do giro anticiclônico semi-estacionário do Atlântico Sul (Krusche et al., 2002; Costa and Moller, 2011), gera fortes influências na região sul, principalmente durante o Inverno e Outono onde inversões periódicas na direção dos ventos para o Sul, Sudoeste e Sudeste estão associadas à propagação de anticiclones polares para regiões de baixa latitude (frentes meteorológicas), sendo mais frequentes durante estas estações (Braga and Krusche, 2000; Krusche et al., 2002).

Durante a Primavera e o Verão dos anos de 2006 e 2007, uma menor variabilidade atmosférica e predominância de ventos Norte e Nordeste foram observados por Braga and Krusche (2000). Os mesmos ventos de Norte e Nordeste, além de possuírem maior incidência, possuem também maiores intensidades do que os ventos oriundos de outras direções (Braga and Krusche, 2000; Krusche et al., 2002).

Costa (2009); Costa and Moller (2011) encontraram resultados semelhantes, entretanto, observaram inversões periódicas na direção dos ventos, comumente associadas à

passagem de sistemas frontais atmosféricos. Saraiva (1996) demonstrou que para este período, o intervalo de passagem de frentes meteorológicas era maior do que os encontrados nas outras estações do ano.

Costa (2009) em um estudo sobre a variabilidade das correntes próximas a *região norte* encontrou que durante a Primavera de 2008 as velocidades de corrente foram mais intensas na superfície do que no fundo, quando comparadas com outras estações estudadas. Costa (2009); Costa and Moller (2011) observaram que com a aproximação da estação da Primavera ocorre menor incidência de frentes frias, e consequentemente ocorre uma redução dos fluxos na direção Nordeste.

Costa (2009) analisou as correntes durante o Outono de 2009 e verificou as menores intensidades de ventos ocorrendo concomitantemente às menores velocidades da corrente. Costa (2009) observou que no Inverno de 2008, a passagem de sistemas frontais (frentes frias) ocorreu com alta frequência na região.

As regiões mais propícias a conversão de energia estão sob maior influência dos ventos de Sudoeste durante os meses do Inverno, quando os ventos de Oeste e as trajetórias dos sistemas frontais se deslocam para norte. Durante o verão, com a migração para sul do cinturão de ventos de Oeste, o giro anticiclônico semi-estacionário do Atlântico Sul volta a dominar (Krusche et al., 2002; Costa and Moller, 2011) com os ventos de Leste e Nordeste sobre a região.

Como grande parte da variabilidade das correntes costeiras está associada à variabilidade atmosférica, é esperado um comportamento similar para as correntes. Este fato pode ser demonstrado através da alta correlação encontrada entre os ventos e as correntes costeiras por Zavialov et al. (2002) e Soares and Möller Jr (2001), para a costa do

Rio Grande do Sul.

A sazonalidade da conversão energética está fortemente relacionada com a sazonalidade das correntes costeiras nas regiões de estudo, corroborando as análises estatísticas realizadas, onde a passagem de sistemas meteorológicos domina as forçantes do movimento oceânico na região. Portanto, durante cada estação do ano a variação destes sistemas pode ser observada nos resultados. Marques et al. (2012) encontraram resultados semelhantes para a conversão de energia na região, onde a periodicidade dos eventos de maior geração energética também está associada à passagem de frentes meteorológicas.

4.3 Análise dos Sítios de Conversão

Os resultados apresentados neste estudo indicaram que as correntes incidentes aos sítios de conversão apresentam um padrão residual de velocidades direcionadas para sudoeste, que pode ser explicado pela dominância de ventos de quadrante Norte ao longo da Plataforma Continental do Sul do Brasil (Möller et al., 2008; Piola et al., 2005; Guerrero et al., 1997).

Em termos de produção média e máxima de energia, para o sítio da região norte, os melhores conversores foram os três primeiros, enquanto que na região sul, por possuir maior estabilidade da conversão, os conversores 5, 6 e 9 apresentaram valores superiores de conversão energética.

A disparidade observada entre os sítios de conversão se deve ao fato da sua posição geográfica e orientação com relação a linha de costa serem diferentes. O sítio localizado ao sul recebe as correntes incidentes com maior homogeneidade entre os conversores devido a sua orientação ser mais ortogonalizada com relação a direção das correntes

incidentes. Por outro lado, o sítio ao norte, apresenta menor homogeneidade entre os conversores, que pode estar associada a sua orientação mais inclinada com relação às correntes incidentes.

A presença das barreiras nas simulações cria zonas de divergência e convergência de fluxos. As zonas de convergência de fluxos são regiões onde o campo de velocidade de correntes é intensificado, agindo como um otimizador da conversão de energia. Entretanto, além destas zonas de divergência e convergência de fluxos que são criadas pela presença das barreira (Akwensivie, 2010), ocorrem alterações no campo de pressão resultante. Nestas regiões de alterações no campo de pressão, os fluxos divergentes ou convergentes devem buscar o equilíbrio hidrostático (Ji et al., 2012; Larsen, 1988), gerando campos de velocidades resultantes intensificados nas regiões adjacentes aos conversores.

Quando o fluido passa por um conversor de energia ele sofre redução de fluxo atrás do rotor (zona de "sombra"). Nesta região o fluido se movimenta com velocidade inferior à corrente livre ao redor do conversor e à velocidade incidente, devido às perdas pela conversão. Desta forma, a corrente deve se expandir para manter a conservação da quantidade de massa (Myers and Bahaj, 2012). Esta manutenção ocorre de forma gradual no formato de um cone se expandindo na zona de sombra do conversor. Este efeito é denominado *Wake*, ou efeito esteira (Ji et al., 2012; Myers and Bahaj, 2012; Akwensivie, 2010; Larsen, 1988).

Na região da zona de "sombra" dos conversores, é possível ser observado o efeito turbulento gerado pelos conversores adjacentes. Na simulação que não considera a presença das barreiras, este efeito é puramente hidrodinâmico, onde a variação do campo de velocidade de correntes devido a conversão de energia gera alterações no padrão de

vorticidade local. Por outro lado, nas simulações onde são consideradas as barreiras, este efeito aparece como contribuição das alterações dos processos hidrodinâmicos e do efeito de forma considerado para os conversores.

A mistura turbulenta que ocorre na região de contorno, causada pelo efeito esteira e pela corrente livre, atua como retro alimentação do efeito esteira, elevando sua velocidade e forçando sua quebra em pequenos vórtices (Pinon et al., 2012; McCombes et al., 2009). Em uma grande distância do conversor, o efeito esteira se dissipa completamente e o campo de velocidades retoma o seu padrão inicial observado na região da frente do conversor (Myers and Bahaj, 2012; Maganga et al., 2010).

Os efeitos de esteira podem ser utilizados de forma favorável (Akwensivie, 2010; Vermeer et al., 2003), pois de acordo com Myers and Bahaj (2012), a primeira linha de conversores deve ser posicionada distante lateralmente entre si, de forma a receber o fluxo perpendicularmente, pois esta configuração mantém uma maior eficiência nos conversores. Posteriormente, com uma distância segura entre a linha seguinte, devem ser inseridos outros conversores para receber o fluxo que passa pela primeira linha e que é intensificado, de acordo com a teoria da conservação da quantidade de movimento.

Em relação a variabilidade temporal da conversão de energia, não foram observadas diferenças significativas entre as simulações estudadas, pois a presença das barreiras não induz grandes alterações no padrão temporal da conversão de energia nas escalas de tempo investigadas neste trabalho. Neste sentido, as diferenças observadas nas taxas de conversão são associadas a intensificação da energia convertida devido a intensificação do campo de velocidades (Myers and Bahaj, 2012; Costa and Moller, 2011; Möller et al., 2008). Esta afirmação é corroborada pela análise de ondaletas, onde os processos físicos que dominam altos valores de energia ocorrem em escalas temporais menores do

que 16 dias podendo se prolongar em certos momentos.

O espectro global de energia indica a ocorrência de processos de conversão de energia em ciclos que seguem estas escalas temporais durante todo o período de estudo. Este padrão é similar ao obtido por Marques et al. (2012) no que diz respeito à ocorrência dos processos de conversão e aos ciclos de ocorrência observados por (Costa and Moller, 2011; Möller et al., 2008).

Desta forma, existe uma baixa sazonalidade associada aos eventos de conversão energética, pois os processos associados ao padrão de circulação das correntes costeiras, são fortemente influenciados pela passagem de sistemas meteorológicos e pelas alterações de curto período na intensidade e direção dos ventos (Marques et al., 2012, 2010b,a; Marques, 2009; Zavialov et al., 2002; Soares and Möller Jr, 2001).

A eficiência dos conversores foi estudada em diferentes escalas de tempo pela aplicação da análise espectral cruzada bidimensional de ondaletas (Marques et al., 2010a; Morettin, 2004; Torrence and Compo, 1997), fornecendo um indicativo da variabilidade espacial da conversão de energia em relação a sua temporalidade durante o período estudado.

O sítio da região norte se destaca na conversão energética quando é considerada a presença das barreiras, mantendo alta conversão de energia durante os quatro eventos de ótimo potencial energético. Esta intensificação se deve a alteração do padrão de circulação associado à presença da estrutura física que melhora a eficiência do sítio. A estrutura gera decréscimo de velocidade atrás do conversor (Li and Çalisal, 2009), e posterior incremento de velocidade ao redor da estrutura (Myers and Bahaj, 2012; Akwensivie, 2010; Vermeer et al., 2003) de forma a manter o equilíbrio hidrostático e a

conservação da quantidade de movimento.

Vários estudos abordam esta temática no campo da dinâmica de fluidos utilizando turbinas eólicas (Vermeer et al., 2003). Entretanto, os relatos de casos em sítios de conversão marinhos são escassos (Myers and Bahaj, 2012; Ji et al., 2012; Pinon et al., 2012; Maganga et al., 2010; Mccombes et al., 2009). Estudos recentes demonstraram que os dispositivos de conversão de marés (a partir do aproveitamento da energia cinética) podem reduzir a velocidade do fluido ao redor do dispositivo (Li and Çalisal, 2009).

Devido a esta interação negativa, em um sítio de conversão de energia, o total de energia disponível para a conversão é supostamente reduzido pela presença das turbinas (Garrett and Cummins, 2008; Mueller and Wallace, 2008; Bryden and Couch, 2006). Entretanto, a identificação do formato ideal para os conversores, além de seu posicionamento adequado na estrutura do sítio, pode reverter esta situação.

Quando a área de estudo se trata de uma região de fluxo bidirecional, como correntes de maré, o conhecimento da hidrodinâmica local se torna mais acessível para a instalação de sítios de conversão de energia. Entretanto, o estudo apresentado visa investigar a viabilidade da instalação de sítios de conversão na plataforma continental interna, adicionando assim, inúmeras variáveis que podem dificultar a determinação apropriada do formato e posicionamento ideal do sítio de conversão.

Myers and Bahaj (2012) estudaram os efeitos do fluxo em linhas de conversores, e determinaram que para definir a geometria de um sítio, os estudos devem partir de um formato simplificado em linha, e então aprimorados para geometrias mais complexas de acordo com a área de estudo. A escolha do conversor também depende das característi-

cas físicas e espaciais do local de instalação (Khan et al., 2009; Li et al., 2007).

De acordo com Myers and Bahaj (2012), a separação lateral adequada pode intensificar o fluxo entre os conversores sem causar danos significativos às estruturas. Esta intensificação pode ser até 22% maior do que o fluxo incidente anteriormente nos conversores. Desta forma, é recomendado pelos autores, a instalação de um terceiro conversor para receber esta corrente intensificada que passa pela linha dos conversores frontais.

Apesar disso, não é possível determinar os impactos na região adjacente aos sítios de conversão. Nas plataformas oceânicas, estudos em larga escala da distorção das correntes oceânicas por conversores de energia, e os impactos causados por eles são escassos (Neill et al., 2009), inclusive considerando a distância na qual este impacto pode ser observado (Shapiro, 2011).

Os eventos de alta geração de energia foram relacionados a incidência de fortes ventos de quadrante Sul ou Norte. Entretanto, a conversão de energia mais intensa foi observada para condições de ventos de Norte/Nordeste, enquanto que, outro evento de conversão menos intenso foi associado a ventos moderados de Noroeste.

Estes resultados são associadas a conformação da região costeira e da proximidade dos sítios à linha de costa, que acabam por não gerar gradientes de velocidade grandes o suficiente para induzir as melhores condições de conversão energética sob determinadas condições hidrodinâmicas.

Como grande parte da variabilidade das correntes costeiras está associada às variabilidades atmosféricas, é esperado um comportamento similar para as correntes (Costa and Moller, 2011; Möller et al., 2008). Este fato pode ser demonstrado através da alta

correlação encontrada entre o vento e as correntes costeiras por Zavialov et al. (2002) e Soares and Möller Jr (2001), para a costa do Rio Grande do Sul.

Os sítios de conversores demonstraram grande capacidade energética para a região norte. Myers and Bahaj (2005, 2012) estudaram um sítio de conversão teórico contendo 71 conversores de diferentes tamanhos em Alderney Race (Reino Unido), cuja potência nominal total do sítio é de 1496 MW, alcançando valores integrados de energia de 1.34 TWh ao ano, equivalente a 0.33% da necessidade energética do Reino Unido para o ano de 2007 (401 TWh).

Considerando o sítio de conversão da região norte, cuja potência nominal total é de 1.7 MW, e sua capacidade anual de produção de energia é de 59,39 GWh (referente a 16.49 MW de potência integrada do sítio), podemos inferir que esta energia é equivalente a 0.22% do consumo energético do estado do Rio Grande do Sul no ano de 2010 (26,5 TWh) de acordo com Capeletto and De Moura (2010).

Capítulo 5

Conclusões

A Plataforma Continental do Sul do Brasil é uma região de dinâmica fortemente influenciada pelo regime de ventos (Nordeste/Sudoeste) e pelas correntes costeiras. Estas condições possibilitam a utilização de conversores de energia das correntes, de forma que, foi possível observar que as regiões de maior potencial energético estão associadas às regiões de intensas variações topográficas. Visto que, o padrão de circulação costeira é altamente induzido pelas variações da batimetria nas proximidades da zona costeira.

Podemos indicar como principais conclusões deste trabalho:

- A) Determinação do conversor de energia de correntes mais apropriado para a região de estudo:
 - Na Plataforma Continental do Sul do Brasil, foram encontradas duas regiões com maior potencial para instalação dos conversores de energia de correntes. Devido às características das velocidades de correntes e o encontro de massas de água na região de estudo, recomenda-se a utilização de uma turbina

que tenha a capacidade de converter energia das correntes de forma multidirecional, sendo a mais indicada neste caso, a turbina de hélice helicoidal, como a proposta por Gorlov (2010).

- B) Avaliação da viabilidade energética da região de estudo, de forma a identificar regiões ótimas para a conversão de energia:
 - A região ao norte se destaca com o maior potencial energético, podendo um único conversor gerar em média $10kW/Dia$, e atingir uma taxa de conversão de energia integrada de $3.5MW/Ano$. A região sul possui menor potencial energético, gerando em média $3.5kW/Dia$ e valores integrados de $1.5MW/Ano$, mas possui a vantagem de essa energia ter mais estabilidade em sua conversão.
 - As regiões de maior conversão energética estão associadas às áreas de intensas variações topográficas. A circulação costeira é altamente induzida pelas variações do fundo e ocasionam alterações no padrão de circulação existente. Neste sentido, ocorre o aumento do potencial para conversão de energia elétrica.
- C) Análise do potencial de conversão de energia em curto e médio prazo através na análise de variabilidade temporal e espacial:
 - Ao mesmo tempo que a região norte é propícia para a conversão de energia elétrica, ela é a região menos estável em termos energéticos, pois as variações sazonais podem aumentar ou diminuir o potencial energético da região.
 - As estações do inverno, verão e outono se comportam de forma similar, gerando quantidades de energia entre 7.5 a $9kW/Dia$. Por outro lado, a

primavera se destaca como estação do ano mais energética podendo produzir $1.3MW/Primavera$. Entretanto também pode passar por períodos de menor geração energética, visto que também apresenta o maior desvio padrão.

- Para a região sul, a capacidade de conversão energética é inferior a região norte, entretanto, possui maior estabilidade para a conversão de energia, por apresentar médias e desvios menores, com leves variações sazonais. A velocidade média de corrente se apresenta mais elevada para a estação da primavera exercendo um potencial energético em torno de $5.0 \pm 8.0kW/Dia$, com potência integrada em torno de $0.45MW/Primavera$.
- A ocorrência de processos com escalas temporais menores que 16 dias têm maior potencial de conversão energética, durante todo o período de estudo, estão associados à passagem de sistemas meteorológicos. Estes processos promovem alterações na intensidade e direção dos ventos, que regem a circulação das correntes na região da plataforma continental interna do Rio Grande do Sul, gerando assim, mais energia disponível, proporcionalmente às maiores velocidades de corrente incidentes.
- D) Investigação da influência das correntes e variação dos fluxos como contribuição para a conversão de energia dentro de sítios de conversão:
 - Os sítios de conversores demonstraram ter ótimo potencial de instalação nas regiões estudadas. A presença das barreiras nas simulações demonstrou influenciar positivamente no campo de velocidade residual ao redor dos conversores, agindo como um intensificador da conversão de energia.
 - As alterações no balanço hidrostático e o desequilíbrio causado pela geração de energia na conservação da quantidade de movimento geram o efeito

esteira, que acaba por interagir positivamente nos sítios de conversão, intensificando o campo de velocidades ao redor das estruturas.

- O sítio da região norte com a presença das barreiras se destaca, mantendo boa conversão durante os quatro eventos de ótimo potencial energético. Esta melhora se deve ao efeito de intensificação do campo de correntes associado à presença da estrutura física que otimiza a eficiência do sítio.
- Em relação à variabilidade temporal da conversão de energia, não foram observadas diferenças significativas entre as simulações estudada. Sendo assim, a presença das barreiras não induz grandes alterações no padrão temporal da conversão de energia nas escalas temporais analisadas neste trabalho.
- Os eventos de alta geração de energia foram relacionados a incidência de fortes ventos (superiores a 15 m/s) tanto do quadrante sul quanto de norte, indicando que pelo formato e disposição dos conversores, ventos de sudoeste e norte podem favorecer ótimos eventos de conversão de energia.
- O sítio da região norte demonstrou alta capacidade de conversão de energia, indicando uma conversão integrada de aproximadamente $59,39\text{ GWh}$, o que equivale a 0.22% do consumo energético do estado do Rio Grande do Sul no ano de 2010.

Analogamente, para que os sítios de conversão utilizados neste trabalho exerçam maior potencial energético sobre as regiões estudadas, as turbinas deveriam possuir área maior, ou então apresentarem difusores, que podem incrementar a conversão de energia da região através da intensificação da velocidade de corrente devido a sua canalização.

Capítulo 6

Trabalhos Futuros

Ao finalizar este trabalho, percebemos que várias análises devem ser feitas, que outras variáveis podem ser selecionadas para o estudo. A seguir constam algumas sugestões para trabalhos futuros que devem ser investigadas na sequência deste trabalho.

6.1 Inclinação com a costa

Trabalhos futuros devem objetivar a instalação dos conversores ortogonais à costa, pois neste trabalho, o uso de conversores paralelamente ocasionou maior potencial nos conversores mais externos, e menor potencial de conversão de energia nos conversores internos. Esperamos em um sítio de conversão ortogonal as linhas de corrente, uma homogeneidade maior na conversão de energia.

6.2 Difusor

Como foi observado nos resultados e conclusões deste trabalho, existem grandes possibilidades do uso da energia das correntes na região, entretanto, este potencial energético pode ser aumentado com o uso de difusores (figura 6.1).

Vários estudos sobre aplicação, forma e impacto dos difusores já foram realizados (Ponta and Jacovkis, 2008; Ponta and Dutt, 2000). De acordo com Rodrigues (2007) a presença de difusores acelera o fluxo incidente à turbina, potencializando a conversão da energia das correntes. Em certos casos, podem aumentar em 50% a velocidade incidente ao rotor. Entretanto, Khan et al. (2009) demonstra incertezas sobre o uso de difusor em conversores verticais (36% de recomendações para evitar o uso de difusor).

Estudos sobre a possibilidade de adotar difusores nas regiões mais viáveis da PCSB devem ser realizados, concomitantemente a otimização da geometria e orientação de instalação das turbinas com relação as linhas de corrente. A presença de difusor torna o fluxo incidente bidirecional e controlado, permitindo a instalação de turbinas axiais que possuem maior coeficiente de eficiência de turbina.

6.3 Cavitação

A cavitação é um efeito causado pelas bolhas de vapor que a turbina pode criar ao rotacionar, dependendo da velocidade incidente e da pressão que é exercida no interstício da lâmina, pode ocorrer erosão, quebra da turbina e ainda reduções no giro das pás.

Inúmeros estudos já foram realizados utilizando modelos numéricos de simulação

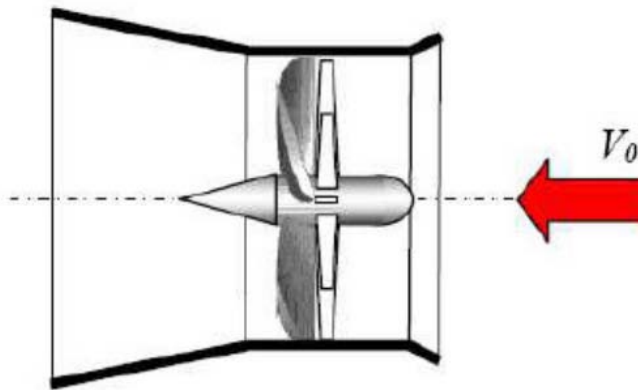


Figura 6.1: *Exemplo de um difusor em uma turbina hidrocínética.*

de processos hidrodinâmicos em pequenas escalas por Ji et al. (2012) e Niblick (2012), XFOil (Batten et al., 2006), entre outros. O domínio deste fenômeno físico pode determinar velocidades adequadas de rotação das lâminas e tornando os resultados mais próximos da realidade.

6.4 Wake - Efeito esteira

É um efeito importante, principalmente quando se trata de sítios de conversão (Myers and Bahaj, 2012). Para isso, a leitura de Ji et al. (2012); Myers and Bahaj (2012); Akwensivie (2010); Larsen (1988); Li and Çalisal (2009); Myers and Bahaj (2012); Maganga et al. (2010); Li and Calisal (2010); Myers and Bahaj (2005); Giles et al. (2011) é recomendada.

6.5 Aquecimento e ruído

O calor e o ruído emitidos pelo equipamento são relevantes para a avaliação ambiental em caso de aplicação de sítios de conversão. Animais marinhos sofrem mais com este tipo de interferência (Dolman et al., 2010; Shields et al., 2009, 2011; Dolman and Simmonds, 2010), entretanto pouco sobre o assunto é encontrado na literatura Li and Çalisal (2009).

6.6 Valoração da estrutura

Atualmente, podem ser realizados estudos de valoração da estrutura dos conversores que serão instalados. Douglas et al. (2008) realizaram a valoração da turbina SeaGen e definiu seu retorno ambiental, ou seja, em termos de energia gasta para a construção do SeaGen, levaria 14 meses de operação para o retorno total, enquanto que para o gasto em CO₂, o retorno seria de 8 meses.

Estudos de valoração e impacto são pouco frequentes devido a inexistência de equipamentos em funcionamento para realizar esta previsão. Para saber mais sobre o assunto, sugere-se a leitura de Cowan et al. (2010); Douglas et al. (2008).

6.7 Impactos dos conversores

Relatórios de monitoramento ambiental sobre os impactos causados pelos conversores podem ser encontrados nas páginas virtuais das empresas que já possuem conversores instalados, como a SeaGen. Nestes relatórios é possível encontrar informações úteis para iniciar uma análise de impactos.

Entretanto, algumas informações destes relatórios podem ser incoerentes. Marques et al. (2012) estimaram grandes alterações morfodinâmicas nas regiões ao redor dos conversores. Li and Çalisal (2009) alcançaram resultados interessantes com o uso de uma equação adimensional para a intensidade sonora emitida pelo conversor, e o efeito que esta intensidade causa nos peixes. A dinâmica das correntes marinhas ao redor dos conversores também sofre grandes impactos (Vennell, 2011), além da geração do efeito esteira.

De acordo com Guney and Kaygusuz (2010), as comunidades bentônicas, animais incrustantes como ostras e cracas, além de algas marinhas podem ser afetadas pela estrutura do gerador. Vários autores (Khan et al., 2008; Grabbe et al., 2009) afirmam também que estruturas como conversores marinhos alinhados em um sítio de conversão podem gerar grandes emissões de ruídos além de ocultar o movimento de animais aquáticos (Dolman et al., 2010; Shields et al., 2011, 2009; Dolman and Simmonds, 2010). A estrutura, canais e outras alterações humanas podem alterar a hidrologia e os regimes de sedimentos. Entretanto estudos sobre os impactos necessitam de comparações cuidadosas.

6.8 Atualização do módulo de energia

Atualmente, existem poucos estudos relacionados a conversão de energia das correntes marinhas, devido a isto, este trabalho foi realizado com várias aproximações e inferências baseadas em resultados para conversores de energia de correntes de marés. Garrett and Cummins (2008); Vennell (2011), revisaram a fórmula tradicional do potencial máximo disponível e relacionaram com fatores biológicos e de navegação.

Estes autores demonstraram que em certos momentos o potencial disponível pode ser reduzido de 38% para 17% devido a presença do conversor. Fatores como fricção interna no canal de maré e também coeficientes de arrasto são adotados para definir a velocidade de corrente resultante da conversão. Da mesma forma, a presença do difusor (Rodrigues, 2007; Ponta and Jacovkis, 2008), e outros efeitos físicos (Li and Çalisal, 2009) deve ser considerada no equacionamento.

Capítulo 7

Produção Científica Associada ao Trabalho

7.1 Artigos completos publicados em periódicos

- KIRINUS, E. P. ; STRINGARI, C. E. ; MARQUES, W. C. 2012. "*Viabilidade de conversão da energia de correntes marinhas na Plataforma Continental Sul do Brasil*". VETOR.
- KIRINUS, E. P. ; MARQUES, W. C. ; DA COSTA, J. C. ; FERNANDES, E. H. L. 2012. "*The Contribution of Waves in the Patos Lagoon Plume Mixing Processes*". International Journal of Geosciences, v. 1, p. 15-20, 2012. doi:10.4236/ijg.2012.
- BRUM, R. S. ; NEVES, C.S. ; KIRINUS, E. P. ; DOS SANTOS, R. ; EMMENDORFER, L. R. 2011. "*Modelagem Ambiental: Perspectivas e Contribuições*". Revista Jr de Iniciação Científica em Ciências Exatas e Engenharia, v. 1, p. 15-20.

7.2 Artigos completos aceitos para publicação

- MATZENAUER, H. B. ; MARQUES, W. C. ; KIRINUS, E. P. 2013. *O Modelo Multicritério de Avaliação de Alternativas Construído para a Implantação do Parque de Conversores de Energia de Correntes Marinhas em Energia Elétrica I: Procedimentos Metodológicos*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos.
- MATZENAUER, H. B. ; MARQUES, W. C. ; KIRINUS, E. P. 2013. *O Modelo Multicritério de Avaliação de Alternativas Construído para a Implantação do Parque de Conversores de Energia de Correntes Marinhas em Energia Elétrica II: Análise dos Resultados*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos.

7.3 Artigos submetidos

- KIRINUS, E. P. ; MARQUES, W. C. ; JUNG, B. M. 2012. "Viability of the application of marine current power generators in the South Brazilian Shelf". Renewable Energy.

Capítulo 8

Referências

Referências Bibliográficas

- Akwensivie, F. (2010). *In The Wake of a Marine Current Turbine*. Master thesis, University of Strathclyde, 111p.
- Aquamarine (2008). Aquamarine power announces contract with ABB for Neptune. Available from: <http://www.aquamarinepower.com/newsand-events/news/latest-news/view/51/aquamarine-power-announces-contract-with-abb-for-neptune/>.
- AS., H. S. (2007). World leading technology developed by Hammerfest Strom. Available from: <http://www.hammerfeststrom.com/content/view/58/86/lang,en/>.
- Aseff, C. D. (2009). *Estudo da variação sazonal na composição físico-química das massas de água da Plataforma Continental do Atlântico Sudoeste (PCASO) entre Mar del Plata (Argentina, 38° S) e Itajaí (SC, 26° S)*. Master thesis, Universidade Federal do Rio Grande.
- Asif, M. and Muneer, T. (2007). Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(7):1388–1413.

- Atlantis (2008). Nereus and Solon Tidal Turbines. Available from: <http://www.atlantisresourcescorporation.com/technology/>.
- Barros G. P. and Marques, W. C. (2012). Long-term temporal variability of the freshwater discharge and water levels at Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *International Journal of Geophysics*.
- Batten, W. M. J., Bahaj, A. S., Molland, A. F., and Chaplin, J. R. (2006). Hydrodynamics of marine current turbines. *Renewable Energy*, 31:249–256.
- Bollmann, M., Bosch, T., Colijn, F., Ebinghaus, R., Froese, R., and Güssow, K. (2010). *World Ocean Review*. Maribus, Hamburg, 1 edition.
- Braga, M. F. and Krusche, N. (2000). Padrão de ventos em Rio Grande, RS, no período de 1992 a 1995. *Atlântica*, 22:27–40.
- Brown, M. A., M, A., Franchunk, C., Koske, B. H., Michaels, G., and Pellegrino, J. (2006). Results of a Technical Review of the U.S. Climate Change Technology Program's R&D Portfolio. Technical report, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Bryden, I. G. and Couch, S. J. (2006). Marine energy extraction: tidal resource analysis. *Renewable Energy*, 31(2):133–139.
- Burrage, D., Wesson, J., Martinez, C., Pérez, T., Möller, O. O., and Piola, A. (2008). Patos Lagoon outflow within the Río de la Plata plume using an airborne salinity mapper: Observing an embedded plume. *Continental Shelf Research*, 28:1625–1638.
- Business, I. E. (2008). Stingray tidal stream generator. Available from: http://www.engb.com/services_09a.php.

- Capeletto, G. J. and De Moura, G. H. Z. (2010). Balanço Energético do Rio Grande do Sul 2010: ano base 2009.
- Castro, B. M., Lorenzetti, J. A., Silveira, I. C. A., and Miranda, L. B. (2006). Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In ROSSI and WONGTSCHOWSKY, C. L. D. B., editors, *O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região sudeste-sul do Brasil*, chapter 1, pages 11–20. Edusp, São Paulo.
- Chelton, D. B., Schlax, M. G., Witter, D. L., and Richmann, J. G. (1990). GEOSAT altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 95:877–903.
- Ciotti, A. M., Odebrecht, C., Fillmann, G., and Moller, O. O. (1995). Freshwater outflow and Subtropical Convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental shelf. *Continental Shelf Research*, 15:1737–1756.
- Cornett, A. (2006). Inventory of Canada's marine renewable energy resources. Technical report, Canadian Hydraulics Center. CHC-TR-041.
- Costa, R. L. (2009). *Estudo sobre a variabilidade sazonal e da estrutura vertical das correntes costeiras da plataforma interna, ao largo de Rio Grande – RS*. Master thesis, Universidade Federal de Rio Grande. 86 p.
- Costa, R. L. and Moller, O. O. (2011). Estudo da estrutura e da variabilidade das correntes na área da plataforma interna ao largo de Rio Grande (RS , Brasil), no sudoeste do Atlântico Sul , durante a primavera-verão de 2006-2007. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 11(3):273–281.

- Cowan, K., Daim, T., and Anderson, T. (2010). Exploring the impact of technology development and adoption for sustainable hydroelectric power and storage technologies in the Pacific Northwest United States. *Energy*, 35(12):4771–4779.
- Cruz, J. M. B. P. and Sarmiento, A. J. N. A. (2007). Sea State Characterization of the Test Site of an Offshore Wave Energy Plant. *Ocean Engineering*, (24):763–775.
- da Silva, J. V. (2008). *Análise numérica da propagação de ondas na costa do Rio Grande do Sul entre Torres e Mostardas*. PhD thesis, Universidade Federal de Rio Grande.
- Defne, Z. (2010). *Multi-Criteria assessment of wave and tidal power along the Atlantic coast of the southeastern USA*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology.
- Dolman, S. and Simmonds, M. (2010). Towards best environmental practice for cetacean conservation in developing Scotland ' s marine renewable energy. *Marine Policy*, 34(5):1021–1027.
- Dolman, S. J., Green, M., and Simmonds, M. P. (2010). Marine Renewable Energy and Cetaceans. *Offshore (Conroe, TX)*, (Figure 1):1–9.
- Douglas, C. A., Harrison, G. P., and Chick, J. P. (2008). Life cycle assessment of the Seagen marine current turbine. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, page 1:12. v. 222.
- Energy, B. (2008a). Tidal power. Available from: www.bluenergy.com.
- Energy, L. (2008b). Renewables boost as Lunar Energy seals £500 m deal. Available from: <http://www.lunarenergy.co.uk/News.php>.

- Energy, O. F. (2008c). Development status. Available from: <http://www.oceanflowenergy.com/development-status.htm>.
- Energy, T. (2008d). DeltaStream concept. Available from: <http://www.tidalenergyltd.com/technology.htm>.
- EPA (2005). State CO₂ Emissions from Fossil Fuel Combustion. Technical report, Environmental Protection Agency.
- EPRI (2006). Tidal power in North America Environmental and Permitting Issues. Technical report, Devine Tarbell & Associates Inc., Electric Power Research Institute's . EPRI-TP-007-NA.
- Fernandes, E. H. L., Dyer, K. R., and Möller Jr, O. O. (2001). On the hydrodynamics of the world's largest choked coastal lagoon: Patos Lagoon (Brazil). *Estuaries*.
- Fernandes, E. H. L., Dyer, K. R., Möller Jr, O. O., and Niencheski, L. F. (2002). The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Niño event (1998). *Continental Shelf Research*, 22:1699–1713.
- Flather, R. A. (1976). Results from surge prediction model of the North-West European continental shelf for April, November and December 1973. Technical report, Institute of Oceanography (UK), Report n° 24.
- Fraenkel, P. L. (2007). Marine current turbines: pioneering the development of marine kinetic energy converters. In *Proceedings of IMechE Part M A Journal of Power and Energy*, page 159–169.
- Garrett, C. and Cummins, P. (2008). Limits to tidal current power. *Renewable Energy*, 33:2485–2490.

Generation, P. (2008). Hydrofoils or turbines. Available from: <http://www.pulsetidal.com/?q=node/25>.

Giles, J., Myers, L., Bahaj, A., and Shelmerdine, B. (2011). The downstream wake response of marine current energy converters operating in shallow tidal flows. In *World Renewable Energy Congress*, pages 2270–2277, Linköping, Sweden. Marine and Ocean Technology.

Gordon, A. L. (1989). Brazil - Malvinas Confluence - 1984. *Deep-Sea Research*, 36:359–384.

Gorlov, A. (2001). Tidal Energy. *Academic Press*, pages 2955–2960.

Gorlov, A. (2006). Cross Flow / (Helical) Turbine. In *Hydrokinetic and Wave Energy Technologies Technical and Environmental Issues*, Washington, D.C.

Gorlov, B. A. (2010). Helical Turbine and Fish Safety. pages 1–14.

Grabbe, M., Lalander, E., Lundin, S., and Leijon, M. (2009). A review of the tidal current energy Resource in Norway. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:1898–1909.

Gross, R. (2004). Technologies and innovation for system change in the UK: status, prospects and system requirements of some leading renewable energy options. *Energy Policy*, 17:1905–1919.

Guerrero, R. A., Acha, E. M., Framiñan, M. B., and Lasta, C. A. (1997). Physical oceanography of the Río de la Plata Estuary, Argentina. *Continental Shelf Research*, 17(7):727–742.

- Guney, M. and Kaygusuz, K. (2010). Hydrokinetic energy conversion systems : A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:2996–3004.
- Haimovici, M., Castello, J., and Vooren, C. (1998). Pescarias. In Seeliger, U., Odebrecht, C., and Castelo, J. P., editors, *Os Ecossistemas Costeiro e Marinho do Extremo Sul do Brasil*, pages 205–218. Ecoscientia.
- Hall, D. G., Reeves, K. S., Brizzee, J., L., R. D., C., G. R., and Sommers, G. L. (2006). Feasibility Assessment of the Water Energy Resources of the United States for New Low Power and Small Hydro Classes of Hydroelectric Plants. Technical report, U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Wind and Hydropower Technologies Program, Idaho Operations Office.
- Hammons, T. J. (1993). Tidal Power. In *Proceedings of the IEEE*, pages 419–433.
- Hervouet, J. M. and Van Haren, L. (1996). Recent advances in numerical methods for fluid flows. In Anderson, M. G., Walling, D. E., and Bates, P. D., editors, *Floodplain processes*, pages 183–214. Wiley, Chichester.
- Hydrovision, S. (2008). Tidel stream generator; 2008. Available from: <http://smd.co.uk/products/>.
- IBGE (2010). Censo 2010.
- Ji, B., Luo, X., Wua, Y., Peng, X., and Xu, H. (2012). Partially-Averaged Navier–Stokes method with modified k– ϵ model for cavitating flow around a marine propeller in a non-uniform wake. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55:6582–6588.

- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., and Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis project. Technical report, Bulletin of the American Meteorological Society.
- Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T., and Quaicoe, J. E. (2009). Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Applied Energy*, 86(10):1823–1835.
- Khan, M. J., Iqbal, M., and Quaicoe, J. (2008). River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:2177–2193.
- Kirinus, E. D. P., Marques, W. C., and Jung, B. M. (2013a). Viability of the application of marine current power generators in the South Brazilian Shelf. *Renewable Energy*, in press:1–9.
- Kirinus, E. P., Marques, W. C., and Stringari, C. E. (2013b). Viabilidade de conversão da energia de correntes marinhas na Plataforma Continental Sul do Brasil. *Vetor*, 22((in press)).
- Krusche, N., Saraiva, J. M., and Reboita, M. S. (2002). Normais climatológicas provisórias para 1991 a 2000 para Rio Grande, RS. *Imprensa Universitária*.
- Larsen, G. C. (1988). *A simple wake calculation procedure*. Riso National Laboratory, Denmark.

- Li, Y. and Calisal, S. M. (2010). Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine. *Renewable Energy*, 35(10):2325–2334.
- Li, Y., Calisal, S. M., and Lence, B. J. (2007). Modeling tidal turbine farm with vertical axis tidal current turbines. *IEEE*, pages 697–702.
- Li, Y. and Çalisal, S. M. (2009). Numerical analysis of the characteristics of vertical axis tidal current turbines. *Renewable Energy*, 35(2):435–442.
- Maganga, F., Germain, G., King, J., Pinon, G., and Rivoalen, E. (2010). Experimental characterisation of flow effects on marine current turbine behaviour and on its wake properties. *Renewable Power Generation*, 4(6):498–509.
- Marques, W. C. (2009). *Estudo da dinâmica da pluma costeira da Lagoa dos Patos*. PhD thesis, Universidade Federal de Rio Grande.
- Marques, W. C. (2012). The temporal variability of the freshwater discharge and water levels at the Patos Lagoon, Brazil. *International Journal of Geosciences*.
- Marques, W. C., Fernandes, E. H., Möller Jr, O. O., Moraes, B. C., and Malcherek, A. (2010a). Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf. *Journal of Geophysical Research*, 115.
- Marques, W. C., Fernandes, E. H. L., Malcherek, A., and Rocha, L. A. O. (2012). Energy converting structures in the Southern Brazilian Shelf: Energy Conversion and its influence on the hydrodynamic and morphodynamic processes. *Journal of Geophysical Research*.

- Marques, W. C., Fernandes, E. H. L., and Moller, O. O. (2010b). Straining and advection contributions to the mixing process of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Journal of Geophysical Research*, 115(C6).
- Matacena, E. (2002). Kobold. www.pontediarchimede.com.
- Mccombes, T., Johnstone, C., and Grant, A. (2009). Unsteady 3D Wake Modelling for Marine Current Turbines. In *Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, pages 548–557, Uppsala, Sweden.
- MCT, M. C. T. (2006). SeaGen. <http://www.seageneration.co.uk/>.
- MCT, M. C. T. (2008). SeaGen completed: World's First Megawatt scale tidal turbine installed. Available from: www.marineturbines.com.
- Mendes, J. C. (1994). *Elementos de estratigrafia*.
- Möller, O. O. J., Piola, A. R., Freitas, A. C., and Campos, E. J. D. (2008). The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. *Continental Shelf Research*.
- Möller Jr., O. and Castaing, P. (1999). Hydrographical characteristics of the estuarine area of Patos Lagoon (30°S, Brazil). In *Estuaries of South America-Their Geomorphology and Dynamics*, pages 83–100.
- Monteiro, I. O. (2006). *Modelagem barotrópica da pluma da Lagoa dos Patos*. PhD thesis, Universidade Federal de Rio Grande.
- Montezano, B. E. M. (2007). *Modelo Dinâmico de Visualização de um Aerogerador com Velocidade de Rotação Variável e Controle de Passo em VRML*. PhD thesis, UFRJ.

- Morettin, P. A. (2004). *Ondas e ondaletas: da análise de Fourier à análise de ondaletas*. Edusp, São Paulo.
- Mueller, M. and Wallace, R. (2008). Enabling science and technology for marine renewable energy. *Energy Policy*, 36:4376–4382.
- Myers, L. and Bahaj, A. S. (2005). Simulated electrical power potential harnessed by marine current turbine arrays in the Alderney Race. *Renewable Energy*, 30:1713–1731.
- Myers, L. E. and Bahaj, A. S. (2012). An experimental investigation simulating flow effects in first generation marine current energy converter arrays. *Renewable Energy*, 37(1):28–36.
- NCEP (2004). *Ending the Energy Stalemate: A Bipartisan Strategy to Meet America's Energy Challenges*. Report, Washington DC.
- Neill, S. P., Litt, E. J., Couch, S. J., and Davies, A. G. (2009). The impact of tidal stream turbines on large-scale sediment dynamics. *Renewable Energy*, 34:2803–2812.
- Niblick, A. L. (2012). *Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micropower Generation System*. Master, University of Washington.
- OpenHydro (2008). OpenHydro becomes first tidal energy company to generate electricity onto the UK National Grid. Available from: www.openHydro.com.
- Pimenta, F. M. (1999). *Caracterização dos regimes de refração de onda ao longo da zona costeira do Rio Grande do Sul*. PhD thesis, Universidade Federal de Rio Grande.

- Pinon, G., Mycek, P., Germain, G., and Rivoalen, E. (2012). Numerical simulation of the wake of marine current turbines with a particle method. *Renewable Energy*, 46:111–126.
- Piola, A. R., Campos, E. J. D., Möller Jr, O. O., Charo, M., and Martinez, M. (1999). Continental shelf water masses off eastern South America – 20° to 40°S. In *X SYMPOSIUM ON GLOBAL CHANGES STUDIES*, pages 446–449, Dallas.
- Piola, A. R. and Matano, R. P. (2001). Brazil and Falklands (Malvinas) currents.
- Piola, A. R., Matano, R. P., Palma, E. D., Moller, O. O., and Campos, E. J. (2005). The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, 32:L01603.
- Piola, A. R., Möller, O. O., and Palma, E. D. (2004). El impacto del Plata sobre el Océano Atlántico. *Ciencia hoy*, 14:28–37.
- Piola, A. R., Romero, S. I., and Zajaczkovski, U. (2008). Space-time variability of the Plata plume inferred from ocean color. *Continental Shelf Research*, 28:1556–1567.
- Podestá, G. P. (1997). Utilización de datos satelitarios en investigaciones oceanográficas y pesqueras en el Océano Atlántico Sudoccidental. In BOSCHI, E. E., editor, *El mar argentino y sus recursos pesqueros.*, pages 195–222. Mar del Plata, Argentina.
- Ponta, F. and Dutt, G. S. (2000). An improved vertical-axis water-current turbine incorporating a channelling device. *Renewable Energy*, 20:223–241.
- Ponta, F. L. and Jacovkis, P. M. (2008). Marine-current power generation by diffuser-augmented floating hydro-turbines. *Renewable Energy*, 33:665–673.

- Power, V. (2008). Verdant power's free flow turbines. Available from: <http://www.verdantpower.com/>.
- Raiambal, K. and Chellamuth, C. (2002). Modeling and Simulation of Grid Connected Wind Electric Generating System. In *Proceedings of IEEE TENCON'02*, pages 1847–1952.
- Refocus, R. E. (2008). Tidal power: an update.
- Rodi, W. (1984). Turbulence models and their applications in hydraulics. A state of the art review. *Edition AIRH*.
- Rodrigues, A. P. D. S. P. (2007). *Parametrização e Simulação Numérica da Turbina Hidrocinética – Otimização Via Algoritmos Genéticos*. Doutorado, Universidade de Brasília.
- Rourke, F. O., Boyle, F., and Reynolds, A. (2010). Marine current energy devices : Current status and possible future applications in Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:1026–1036.
- Rüncos, F., R. Carlson, Kuo-Peng, P., H. Voltolini, and Batistela, N. J. (2005). Geração de Energia Eólica - Tecnologias Atuais e Futuras.
- Saraiva, J. M. (1996). *Previsão de tempo na região sul: efeitos locais e influência de liberação de calor latente*. PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- Shapiro, G. I. (2011). Effect of tidal stream power generation on the region-wide circulation in a shallow sea. *Ocean Science*, 7:165–174.

- Shields, M. A., Dillon, L. J., Woolf, D. K., and Ford, A. T. (2009). Strategic priorities for assessing ecological impacts of marine renewable energy devices in the Pentland Firth (Scotland , UK). *Marine Policy*, 33:635–642.
- Shields, M. A., Woolf, D. K., Grist, E. P. M., Kerr, S. A., Jackson, A. C., Harris, R. E., Bell, M. C., Beharie, R., Want, A., Osalusi, E., Gibb, S. W., and Side, J. (2011). Ocean & Coastal Management Marine renewable energy : The ecological implications of altering the hydrodynamics of the marine environment. *Ocean and Coastal Management*, 54(1):2–9.
- Silva, P. D., Marques, W. C., Leao, E. H. F., and Bizutti, R. D. S. (2012). Wave-Current Interaction in the Southern Brazilian Continental Shelf. *Continental Shelf Research*, (in press).
- Soares, I. D. and Möller Jr, O. O. (2001). Low-frequency currents and water mass spatial distribution on the southern Brazilian shelf. *Continental Shelf Research*, 21:1785–1814.
- Souza, R. B. and Robinson, I. S. (2004). Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. *Continental Shelf Research*, 24:241–262.
- Sweers, U. (1976). Monograms to estimate the heat-exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature. *Journal of Hydrology*, 30:375–401.
- Technology, G. (2008). The Gorlov Helical Turbine. Available from: <http://www.gcktechnology.com/GCK/pg2.html>.

- Torrence, C. and Compo, G. P. (1997). A practical guide to wavelet analysis. Technical report, Bulletin of the American Meteorological Society.
- Vaz, A. C., O., M. J. O., and L., A. T. (2006). Sobre a descarga dos rios afluentes à Lagoa dos Patos. *Atlântica*, 28:13–23.
- Vennell, R. (2011). Estimating the power potential of tidal currents and the impact of power extraction on flow speeds. *Renewable Energy*, pages 1–8.
- Vermeer, L. J., Sørensen, J. N., and Crespo, A. (2003). Wind turbine wake aerodynamics. *Progressing in Aerospace Sciences*, 39:467–510.
- Viegas, J. S. and Franz, A. F. H. (2006). Hidrologia do Canal de São Gonçalo. Technical report, FURG-UFPEL, Pelotas.
- WEC (2004). Survey of Energy Resources. Technical report, World Energy Council.
- WEC (2007). Survey of Energy Resources. Technical report, World Energy Council.
- Zavialov, P., Moller, O., and Campos, E. (2002). First direct measurements of currents on the continental shelf of Southern Brazil. *Continental Shelf Research*, 22:1975–1986.
- Zembruski, S. (1979). Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. Technical report, Projeto REMAC, Rio de Janeiro.

Capítulo 9

Anexo I

9.1 Como gerar malhas para a simulação de sítios de conversão.

Para a geração das malhas utilizadas nesta dissertação, foi utilizado o software Matisse, instalado dentro de um VirtualBox no Linux. Foi utilizado para a geração das malha, um notebook Avell com processador Intel® Core™ i7-2720QM CPU 2.20GHz*8 e com 7.7 GB de memória RAM. O arquivo da malha hidrodinâmica utilizada foi o **atual_CORRETA_2012.MAT**, deste arquivo foram criadas as malhas da *região Norte e Sul*.

Informações importantes:

- Os sítios de conversão apresentam uma configuração de 10 turbina com aproximadamente 2km de extensão e 400m de largura, além disso, são paralelos a linha de costa. Essa configuração foi criada no Matlab (figura 9.1), onde cada conversor é formado por 4 pontos, totalizando 40 pontos de "conversores". Estes pontos

foram posteriormente inseridos na malha como pontos de contorno e *Hard Points*, com a batimetria igual a zero.

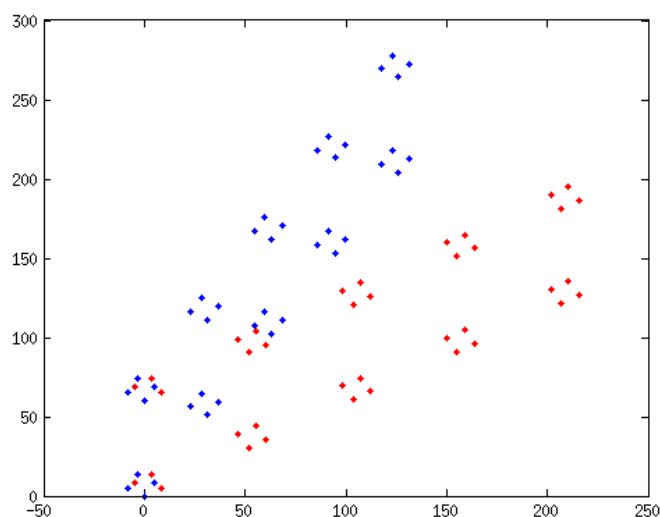


Figura 9.1: *Inclinação dos conversores criada no matlab. Em azul, inclinação de 60 graus utilizado para a região sul, enquanto em vermelho a inclinação de 45 graus adotada para a região norte.*

- A aplicação da metodologia acima para inserir os pontos causou inúmeros problemas para a geração dos critérios, tais como:

9.1.1 Problema 1:

Problemas de referenciamento entre o matlab e o matisse, causavam discordância entre o modelo construído no matlab (figura 9.1), gerando um sítio de conversores com a inclinação correta com a costa, mas com disposição de pontos incorreta (figura 9.2).

Solução do Problema 1: A solução para isto foi bastante simples, através da medida entre a distância dos pontos das arestas do conversor, descobriu-se o conversor

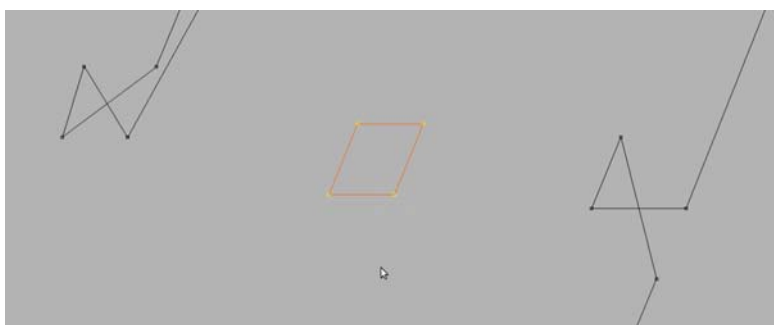


Figura 9.2: *Momento quando os conversores são inseridos no Matisse, e ficam dispostos incorretamente. O formato correto encontra-se em amarelo no centro*

mais próximo do que foi criado no matlab, dessa forma, este conversor foi copiado e colado em cima das posições dos conversores incorretos, deixando desta forma o sítio com o formato correto e a inclinação adequada.

9.1.2 Problema 2:

A proximidade entre os conversores (200m de distância), gerava erros na interpolação batimétrica durante a criação dos critérios (no modo D.E.M), causando uma grande zona de zeros batimétricos, como se fosse uma grande "ilha".

Tentativa de solucionar o problema 2: A primeira tentativa para solucionar este problema, foi a criação de uma batimetria interpolada no matlab para as regiões dos conversores. Esta batimetria consistia primeiramente em 2 conjuntos de dados para cada região, o primeiro contendo uma interpolação grosseira de 200x200m ao redor dos conversores numa área de 36.5x18Km, e a segunda contendo uma interpolação maior de 2x2m numa área de 1000x1500m contendo o sítio de conversão (figura 9.3). Esta solução demonstrou-se **ineficaz** para resolver o problema, pois o dado de 2x2m possuía um total de 360 mil pontos batimétricos, que quando era incluídos no matisse, deixava

a geração dos critérios lentas e demoradas, gerando muitas vezes falha no matisse. Enquanto que o dado de 200x200 não causava o resultado esperando, deixando os critérios criados ineficazes.

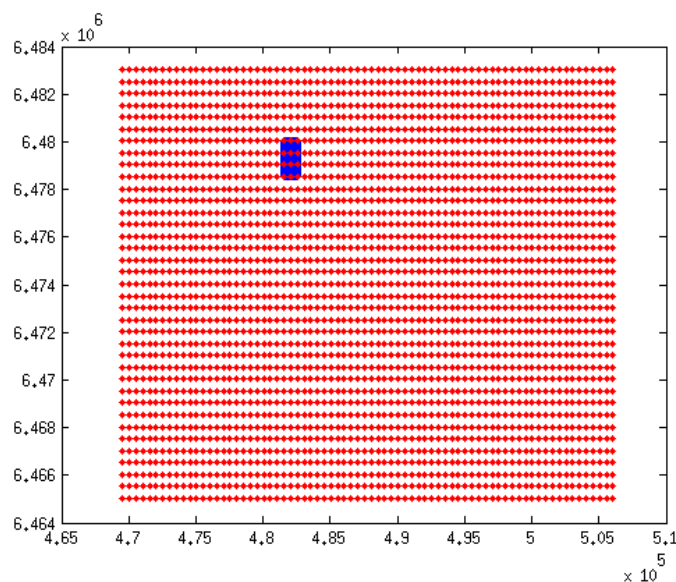


Figura 9.3: *Batimetria interpolada para a região norte, em vermelho dista 200x200 enquanto que a azul possui 2x2 de distância.*

Solução do problema 2: Após incontáveis malhas desperdiçadas com a tentativa anterior, optou-se por uma solução simples. A adição de pontos batimétricos manualmente (figura 9.4). Esta solução demonstrou-se eficaz ao diminuir zeros batimétricos e ainda em definir corretamente o formato alongado do sítio de conversão. Apesar desta medida ter sido tomada, após a finalização da malha, ainda persistiam valores de batimetria errados para a região, então, novamente foram impostos no modo *MESH* (através da opção 'change bathymetry of the points') valores de batimetria igual a -18m para a região, e valores de zero para os conversores (figura 9.5).

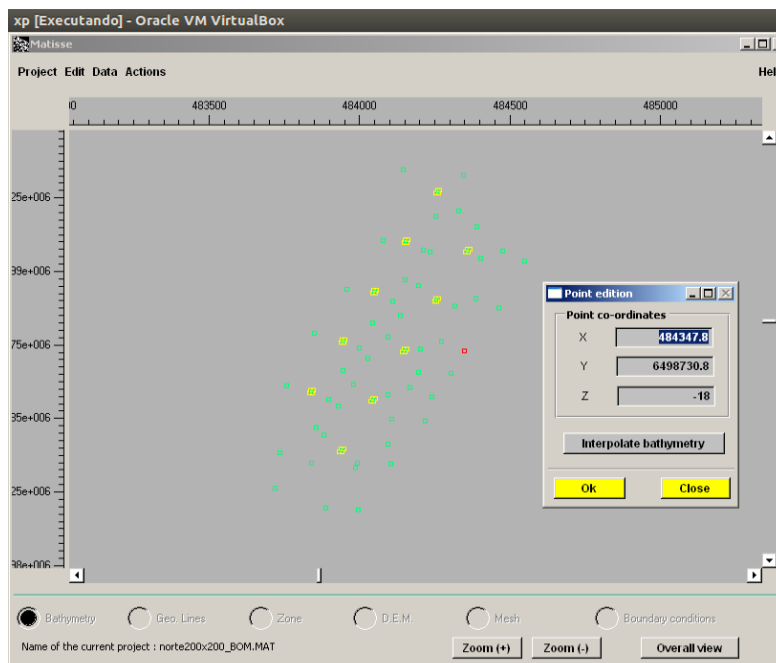


Figura 9.4: Pontos adicionados manualmente ao redor dos conversores da região norte, com batimetria de 18m.

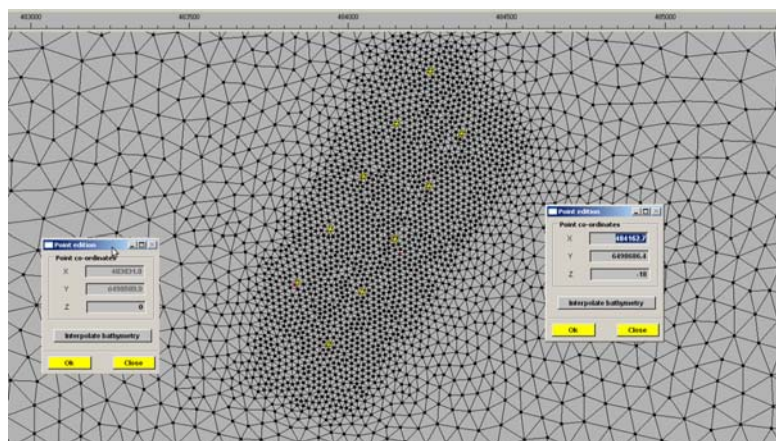


Figura 9.5: Pontos alterados manualmente ao redor dos conversores da região norte no modo MESH, note que os conversores ficaram com zero de batimetria.

9.1.3 Problema 3:

Os critérios das malhas ficaram difíceis de ser controlados para que não houvesse rejeição da malha. Assim, foram adotados os seguintes critérios (tabela 9.1) partindo da malha hidrodinâmica para ambas as regiões.

Tabela 9.1: Critérios adotados.

Critérios	Região	Fator
c15	Conversores	/7
c16	Conversores	/4
c17	Conversores	/10
c18	Conversores	/5

Capítulo 10

Anexo II

10.1 Configuração do Steering File.

```
/---/  
/  PARAMETER FILE FOR TELEMAC3D + OIL + SEDI3D SIMULATION  
/---/  
  
FORTRAN FILE           : funcionaN.f  
GEOMETRY FILE          : norte19k.geom  
BOUNDARY CONDITIONS FILE : norte19k.bdy  
LIQUID BOUNDARIES FILE  : liquid_climatologico.dat  
3D RESULT FILE          : sim_norte_3d.slf  
2D RESULT FILE          : sim_norte_2d.slf  
COMPUTATION CONTINUED   : NO
```

/--TIME SETPS, NUMBER OF LEVELS, TRACERS AND PRINTOUTS/

NUMBER OF TIME STEPS = 350400 TIME STEP = 90

RATIO OF 3D AND 2D TIME STEPS = 1.

GRAPHIC PRINTOUT PERIOD = 240

LISTING PRINTOUT PERIOD = 40

NUMBER OF HORIZONTAL LEVELS = 15

NUMBER OF TRACERS = 2

/-----SEDI3D MODULE-----/

SEDIMENT = NO

GIBSON CONSOLIDATION MODEL= YES

MAXIMUM NUMBER OF LEVELS DISCRETIZING THE BOTTOM = 2

SOLVER FOR DIFFUSION OF THE SEDIMENT = 1

PRECONDITIONING FOR DIFFUSION OF THE SEDIMENT = 2

DENSITY OF THE SEDIMENT = 1140 / 2650

CRITICAL SHEAR STRESS FOR DEPOSITION = 0.1

CONCENTRATION OF FRESH DEPOSITS = 160

BED LAYERS THICKNESS =5.E-1

TIME STEP FOR CONSOLIDATION = 2400

MAXIMUM CONCENTRATION OF THE CONSOLIDATED MUD = 500

EROSION COEFFICIENT = 1.E-5

CRITICAL SHEAR STRESS FOR EROSION = 0.4

FLOCULATION COEFFICIENT = 0.3

COEFFICIENT RELATIVE TO FLOC DESTRUCTION = 0.09

CONSTANT SEDIMENT SETTLING VELOCITY = 0

/RESIDENCE TIME FOR MUD = 5000

/MULTILAYER CONSOLIDATION MODEL = NO

INFLUENCE OF TURBULENCE ON SETTLING VELOCITY = YES

MEAN DIAMETER OF THE SEDIMENT = 0.000011

COHESIVE SEDIMENT = YES

/-----INITIAL AND LIQUID BOUNDARY CONDITIONS-----/

INITIAL CONDITIONS : 'CONSTANT ELEVATION'

INITIAL VALUES OF TRACERS : 35;20

INITIAL ELEVATION =0.75

PRESCRIBED FLOWRATES= 0;0;0;12000;12000;12000

PRESCRIBED ELEVATIONS = 0;0.75;0;0;0;0

PRESCRIBED VELOCITIES= -0.15;0;-0.15;0;0;0

PRESCRIBED TRACERS VALUES = 35;20;35;20;35;20;0;0;0;0;0;0

RAIN OR EVAPORATION IN MM PER DAY = 0

/--SCHEMES, PRECONDITIONING, SOLVERS AND INTERACTIONS--/

SCHEME FOR ADVECTION OF DEPTH = 5

SCHEME FOR ADVECTION OF VELOCITIES = 1

SCHEME FOR ADVECTION OF TRACERS = 5

DIFFUSION STEP = YES

SCHEME FOR DIFFUSION OF VELOCITIES = 1

SCHEME FOR DIFFUSION OF TRACERS = 1

PRECONDITIONING FOR DIFFUSION OF VELOCITIES = 2

PRECONDITIONING FOR DIFFUSION OF TRACERS = 2

PRECONDITIONING FOR DIFFUSION OF THE SEDIMENT = 2

PRECONDITIONING FOR PPE = 2

PRECONDITIONING FOR PROJECTION = 2

PRECONDITIONING FOR DIFFUSION OF K-EPSILON = 2

SOLVER FOR PROPAGATION = 1

SOLVER FOR PROJECTION = 6

SOLVER FOR DIFFUSION OF VELOCITIES = 1

SOLVER FOR VERTICAL VELOCITY = 1

SOLVER FOR DIFFUSION OF TRACERS = 1

SOLVER FOR DIFFUSION OF THE SEDIMENT = 3

SOLVER FOR PPE = 1

OPTION OF SOLVER FOR DIFFUSION OF VELOCITIES = 3

OPTION OF SOLVER FOR DIFFUSION OF TRACERS = 3

OPTION OF SOLVER FOR DIFFUSION OF K-EPSILON = 3

OPTION OF SOLVER FOR PROPAGATION = 3

OPTION OF SOLVER FOR PPE = 3

OPTION OF SOLVER FOR DIFFUSION OF THE SEDIMENT = 3

OPTION OF SOLVER FOR PROJECTION = 3

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR PROPAGATION = 1000

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR DIFFUSION OF TRACERS = 1000

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR DIFFUSION OF VELOCITIES = 1000

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR VERTICAL VELOCITY = 1000

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR DIFFUSION OF K-EPSILON = 1000

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR PPE = 1000

MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR PROJECTION = 1000

ACCURACY FOR DIFFUSION OF SEDIMENT = 1.E-6

ACCURACY FOR DIFFUSION OF VELOCITIES = 1.E-5

ACCURACY FOR DIFFUSION OF TRACERS = 1.E-6

ACCURACY FOR DIFFUSION OF K-EPSILON = 1.E-6

ACCURACY FOR PROPAGATION = 1.E-6

ACCURACY FOR VERTICAL VELOCITY = 1.E-6

ACCURACY FOR PPE= 1.E-4

ACCURACY FOR PROJECTION = 1.E-6

/-PHYSICAL PARAMETERS AND DENSITY LAW-----/

GRAVITY ACCELERATION = 9.80665

DENSITY FOR STANDARD VALUE = 1025

CORIOLIS = YES

CORIOLIS COEFFICIENT = -7.70735E-5

WIND = YES

WIND VELOCITY ALONG X = 5

WIND VELOCITY ALONG Y = 5

COEFFICIENT OF WIND INFLUENCE = 5.E-6

AIR PRESSURE = NO

BETA EXPANSION COEFFICIENT FOR TRACERS = 0

DENSITY LAW : 3

NAMES OF TRACERS : 'SALINITY' ; 'TEMPERATURE'

/-----SOLID BOUNDARY CONDITIONS AND TURBULENCE-----/

VELOCITY PROJECTED ON SOLID LATERAL BOUNDARIES = YES

VELOCITY PROJECTED ON BOTTOM = YES

BOUNDARY CONDITION ON THE BOTTOM = 1

LAW OF BOTTOM FRICTION= 4

FRICTION COEFFICIENT FOR THE BOTTOM = 0.04

LAW OF FRICTION ON LATERAL BOUNDARIES = 0

FRICTION COEFFICIENT FOR LATERAL SOLID BOUNDARIES = 60

TURBULENCE MODEL FOR LATERAL SOLID BOUNDARIES = 2

TURBULENCE MODEL FOR THE BOTTOM = 2

HORIZONTAL TURBULENCE MODEL= 4

VERTICAL TURBULENCE MODEL = 2

COEFFICIENT FOR HORIZONTAL DIFFUSION OF VELOCITIES = 1.E-3
 COEFFICIENT FOR VERTICAL DIFFUSION OF VELOCITIES = 1.E-3
 COEFFICIENT FOR HORIZONTAL DIFFUSION OF TRACERS = 1.E-3
 COEFFICIENT FOR VERTICAL DIFFUSION OF TRACERS = 1.E-3

MIXING LENGTH MODEL =4
 MIXING LENGTH SCALE = 10
 DAMPING FUNCTION = 3

/-----IMPLICITATION AND STORAGE METHOD-----/

IMPLICITATION FOR DIFFUSION = 1
 IMPLICITATION FOR DEPTH = 0.55
 IMPLICITATION FOR VELOCITIES = 1
 IMPLICITATION FOR DIFFUSION = 1

MATRIX STORAGE : 3 /DEFAULT VALUE = 1
 TELEMAT-2D OPTIONS : 2;2 /DEFAULT VALUE 1;1
 /FIRST INTEGER : COMPLETE SAINT-VENANT SYSTEM
 /SECOND INTEGER : WAVE EQUATION

/--TIDAL FLATS AND OPTION FOR THE HYDROSTATIC STEP---/

TIDAL FLATS : YES
 OPTION FOR THE TREATMENT OF TIDAL FLATS = 1

TREATMENT ON TIDAL FLATS FOR VELOCITIES = 0

TREATMENT ON TIDAL FLATS FOR TRACERS = 0

TREATMENT ON TIDAL FLATS FOR K-EPSILON = 0

OPTION FOR THE HYDROSTATIC STEP : 2

/-----MASS BALANCE---/

MASS-BALANCE : YES

INFORMATION ABOUT MASS-BALANCE FOR EACH LISTING PRINTOUT : YES

/-----TITLE AND GRAPHIC PRINTOUT/

VARIABLES FOR 2D GRAPHIC PRINTOUTS = S,U,V,H,B,X,Y,US

VARIABLES FOR 3D GRAPHIC PRINTOUTS = Z,U,V,W,TA1,TA2,RHO,NUX,NUZ,K,EPS

&ETA