

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

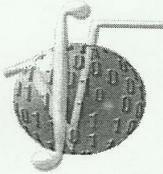
Aplicação do Design Construtal para Avaliação Geométrica de Sítios de Conversão de Energia na  
Plataforma Continental Sul do Brasil

por

Régis Lucas Timm

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Modelagem Computacional

Rio Grande, Agosto, 2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL  
Av. Itália km 8 Campus Carreiros - CEP 96201-900 - Rio Grande/RS  
E-mail: ppgmc@furg.br - Tel: (53) 3293 5055



## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA Nº 16/2017

Ao vigésimo nono dia do mês de agosto, na sala 6105 no Prédio 6 da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, realizou-se a décima sexta sessão de defesa de dissertação do ano de dois mil e dezessete do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional. O mestrando **Régis Lucas Timm** apresentou e defendeu a dissertação "**Aplicação do Design Construtural para Avaliação Geométrica de Sítios de Conversão de Energia na Plataforma Continental Sul do Brasil**" como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional. A sessão foi aberta às catorze horas pelo Prof. Dr. Wiliam Correa Marques, orientador da dissertação e presidente da Comissão de Avaliação. A referida Comissão esteve integrada, além do presidente e orientador, pelo Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos - coorientador, da FURG; pelo Prof. Dr. Liércio André Isoldi, da FURG e pelo Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha, da UNISINOS. Após cada integrante da Banca ter arguido o mestrando, e este ter tido a oportunidade de responder a cada um, a Comissão reuniu-se para deliberar sobre o conceito a ser atribuído ao trabalho. A Comissão de Avaliação considerou o candidato *APROVADO* neste requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional. Por fim, o presidente publicou e encerrou a sessão da qual eu, Wiliam Correa Marques, na qualidade de Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional; lavrei a presente ata que vai assinada por todos os membros da Comissão de Avaliação. Rio Grande, vinte e nove de setembro 2017.

*Wiliam Correa Marques*  
Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Orientador

*Elizaldo Domingues dos Santos*  
Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos

Membro Interno

*Liércio André Isoldi*  
Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Membro Interno

*Luiz Alberto Oliveira Rocha*  
Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Membro Externo

*Wiliam Correa Marques*  
Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Modelagem Computacional

Dedico este trabalho à minha maior incentivadora e companheira para todas as horas,  
Nicolli Evangelista de Bittencourt Timm, meu amor.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me ajudado e acompanhado até o fim desta caminhada, me dando forças para suportar todos os desafios apresentados durante esta etapa.

A minha esposa Nicolli, que foi a maior incentivadora desta conquista, me apoiando desde sempre, me dizendo para nunca desistir mesmo quando as forças já pareciam ter acabado, ela sempre esteve lá para ser meu porto seguro. Mesmo quando eu não falava outra coisa a não ser os trabalhos e estudos que estava fazendo, ela, mesmo sem entender muita coisa do que eu estava falando (quando só falava em refinamento de malha, simulação dos sítios, posição dos conversores) sempre esteve interessada e me fazia perguntas porque sabia que aquilo era importante pra mim. Obrigado amor por ter estado ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus pais, sogros e familiares que me deram força e apoio neste caminho das diversas formas possíveis, sendo liberando no trabalho ou apenas perguntando como ia o estudo, todos vocês fizeram parte desta conquista.

Ao Professor Wiliam Correa Marques, que mesmo sabendo que eu não tinha formação na área de Oceanográfica aceitou ser meu orientador, me ajudando de todas as formas possíveis chegar ao final desta caminhada, estando sempre ao meu lado para tirar todas as dúvidas que surgiam durante o trabalho do qual me apaixonei, obrigado professor.

Ao Professor Elizaldo Domingues dos Santos, que no primeiro semestre do curso me apresentou o Design Construtal e assim passou a ser meu co-orientador, sempre disposto a ajudar, a tirar dúvidas, a dar ideias de como trabalhar melhor o método do design construtal no estudo, muito obrigado professor por ter estado ao meu lado sempre que precisei.

Aos colegas de laboratório que sempre estiveram junto neste tempo em especial ao colega Phelype Haron Oleinik, o qual muitas imagens deste trabalho não teriam sido criadas se não fosse a “Força” ser grande neste rapaz, Phelype obrigado por ter sido um colega TOP-ONE. E como os Jedi sempre dizem “Que a força esteja com você! ”

## RESUMO

As necessidades energéticas do homem estão em constante evolução. Já somos mais de 7 bilhões de pessoas em um planeta onde a mudança do estilo de vida da população é constante e esta mudança faz com que a dependência da humanidade pela energia seja cada vez maior. O panorama mundial está mudando rapidamente, por motivos ligados a três das grandes preocupações da humanidade: meio ambiente, energia e economia global. Atualmente as grandes potências mundiais mantêm investimentos fortes nas fontes de energias renováveis, mas não conseguem se tornar totalmente independentes das fontes de combustíveis fósseis. A preocupação mundial em expandir a matriz energética foi o que ocasionou a busca por um maior número de fontes de energias renováveis possibilitando assim sua maior diversificação. Dentro da diversificação de fontes de recursos energéticos renováveis para uma melhoria da malha energética, os oceanos surgem como uma das opções a serem estudadas. O presente trabalho apresenta um estudo sobre a configuração de um sítio de conversores dentro da Plataforma Continental Sul do Brasil e busca encontrar uma configuração que alcance a maior potencialização de conversão, para isso foi utilizado o método do Design Construtal para o desenvolvimento do melhor arranjo das turbinas levando em consideração suas regras de restrição. Neste estudo foi utilizado o modelo tridimensional TELEMAC3D para análise dos processos hidrodinâmicos, este modelo foi acoplado ao módulo de conversão de energia para o cálculo da potência convertida. Este estudo também realizou uma comparação com estudos encontrados na literatura e apresenta a importância da análise da hidrodinâmica do local onde será implantado o sítio, pois este afeta a posição dos conversores. Os resultados obtidos indicaram que a construção do arranjo segue um padrão assimétrico. Isso ocorreu devido ao comportamento do escoamento não ter um padrão definido, como ocorrem em experimentos controlados. Assim, as recomendações teóricas propostas em estudos de laboratório podem sofrer desvios quando aplicadas em sítios reais, o que não acontece na proposta de estudo realizada aqui, visto que a aplicação ocorreu em um sítio real. A esteira que se desenvolveu após o escoamento passar pelos conversores mostrou que fica inviável a implantação de conversores dentro desta área que chegou a mais de 1000m, levando em conta a quebra na intensidade da corrente que ocorre. O estudo desenvolvido permitiu obter um ganho de potência disponível de 23,73% em comparação com um arranjo simulado proposto na literatura. Dessa forma, o método Design Construtal conduziu a uma importante recomendação teórica sobre o design nesse tipo de aplicação.

Palavras-chaves: Modelagem numérica; Design Construtal; Conversão de energia; Configuração de sítios de conversão; Energia renovável.

## ABSTRACT

The man's energy needs are in constant evolution. There are more than 7 billion people on a planet where the change of population's habits is constant and this change increases the dependence that humanity has related to energy's growth. The world panorama changes fast, for reasons related to three big concerns of humanity: environment, energy and the global economy. Nowadays, the greatest powers keep strong investments in the renewable energy sources, however, they cannot become totally independent of fossil fuel sources. The world concern to increase the energy matrix was the motivation to search for a larger number of renewable energy sources, and it becomes possible their diversification. To improve energy matrix related to the diversification of renewable energy sources, the oceans appear as an option to study. This paper presents a study on a setting of farm converters inside of the Continental Shelf of Southern Brazil and it intends to find a setting that reaches the greater potency of conversion. In this regard, the Constructal Design method was used for developing of turbine arrangement and considering the rules of restriction. In this study, the three-dimensional model TELEMAC3D was used for analyzing of hydrodynamic processes. This model was coupled to the energy conversion module to calculate the converted potency. This study also compared the studies found in the literature and presents the importance of analysis of hydrodynamic of the locality where the farm will be implanted, because it affects the position of the converters. The results indicate that the construction of the arrangement has an asymmetrical pattern. It happened due to the flow behavior, because it does not have a defined pattern, it happens to controlled experiments. Therefore, the theoretical recommendations proposed by laboratory studies can suffer irregularities when they are applied on real farms, it does not happen to purpose of this paper, because in this case the application happened on the real farm. The wave that developed after pass through converters showed that the implementation of converters inside this area exceeded 1000m and it's unfeasible, considering the broken current intensity. The developed study provided a potency gain of approximately 23,73% compared to the simulated arrangement proposed in the literature. Therefore, the Constructal Design method leads an important theoretical recommendation of the design in this application.

Keywords: Numerical modelling; Constructal Design; Energy conversion; Farm conversion settings; Renewable energy.

# ÍNDICE

1. Introdução	14
1.1. Descrição da Área de Estudo	17
1.2. Estado da Arte	21
1.3. Utilização das correntes oceânicas na conversão de energia elétrica	24
1.4. Modelagem Computacional	33
1.5. Design Construtal	34
1.6. Objetivos	35
1.6.1. Objetivos Específicos	35
2. Metodologia	37
2.1. Equacionamento do Modelo	38
2.1.1. Termos fonte das equações da quantidade de movimento	40
2.2. Domínio do Modelo	44
2.3. Geração da Grade de Elementos Finitos	45
2.3.1. Estrutura da Malha Batimétrica	45
2.3.2. Malha Computacional	46
2.4. Discretização Vertical da Malha	48
2.4.1. Transformação Sigma	48
2.5. Condições Iniciais de Contorno	49
2.6. Cálculo da Potência Convertida	52
2.6.1. Cálculo dos Valores de Conversão	54
2.7. Aplicação do Design Construtal	55
2.7.1. Implantação dos Conversores	56
3. Resultados	58
3.1. Implantação do sítio de conversores de energia de corrente e análise da configuração	59
3.2. Análise da Potência Convertida	64
3.3. Séries Temporais	66
3.4. Cálculo dos Valores de Conversão	71
3.5. Comparação com arranjo proposto na literatura	72
4. Conclusão	78
5. Referências	80

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Investimento mundial realizado entre os anos de 2004 e 2015 em energias renováveis, em bilhões de dólares (\$bn). Fonte: Bloomberg New Energy Finance.....	14
Figura 1.2 - Dados da geração de energia a partir de energia eólica de 1996 a 2012. Fonte: Report2013.....	15
Figura 1.3 - Oceano e suas divisões de fundo. Fonte: <a href="http://www.cienciaviva.pt">www.cienciaviva.pt</a> .....	17
Figura 1.4 - Plataforma Continental Sul do Brasil. Fonte: Palma et al. (2008).....	18
Figura 1.5 - Locais encontrados para implantação de sítios de conversão de energia na PCSB. Fonte: Kirinus et al. (2012).....	19
Figura 1.6 - Resultado das simulações realizadas no estudo de Roc et al. (2014) mostrou que o posicionamento intercalado dos conversores dentro do sítio proporcionou um ganho maior de conversão do que quando implantados um após o outro em linhas contínuas.....	22
Figura 1.7 - Da esquerda para direita, cenários 1, 2, 3 e 4 do estudo realizado por Pezzato et al. (2015) na PCSB mostrou que mesmo em diferentes posições, os conversores que estivessem posicionados atrás de outro conversor em relação ao fluxo da corrente, estes perdiam potência de conversão por não receber a mesma intensidade de fluxo.....	22
Figura 1.8 - Locais com maior aproveitamento maremotriz no mundo. Fonte Neto et al. (2011).....	23
Figura 1.9 - Ilustração de uma turbina utilizada para conversão da energia cinética das correntes de maré em eletricidade - SeaGen. Fonte: <a href="http://www.seageneration.co.uk/history.php">http://www.seageneration.co.uk/history.php</a> .....	24
Figura 1.10 - Exemplo de uma turbina no modelo Blue Concept. Fonte: Hammerfest Strom (2011).....	25
Figura 2.1 - Domínio computacional utilizado neste estudo.....	45
Figura 2.2 - Malha para análise da hidrodinâmica do local de estudo.....	47
Figura 2.3 - Área da malha com o maior refinamento alcançado no sítio de conversores. As arestas dos triângulos possuem um distanciamento de 20 m.....	47
Figura 2.4 - Malha tridimensional obtida pela superposição da malha bidimensional de elementos triangulares (modificado de Hervouet e Van Haren (1996)).....	48
Figura 2.5 - Representação tridimensional dos níveis sigma da malha numérica.....	49
Figura 2.6 - Condições de contorno da malha.....	51
Figura 2.7 - Esquema para representar a obtenção do ano climatológico.....	52
Figura 2.8 - Módulo de conversão de energia desenvolvido por Marques et al. (2012).....	53
Figura 2.9 - Demonstração da relação entre a velocidade incidente (vermelho) e o conversor (amarelo) no módulo de conversão de energia.....	54
Figura 2.10 - Esquema com os passos seguidos para a implantação do sítio de turbinas.....	58
Figura 3.1 - Intensidade média da corrente na região localizada próximo ao Farol da Conceição durante o período de 365 dias de simulação. A escala de cores indica a intensidade das correntes em	

$m.s^{-1}$ . Na imagem estão inseridas as isóbatas do local de estudo e a área de restrição está definida pela circunferência onde a profundidade do local fica em torno de 20 m.....59

Figura 3.2 - Intensidade média da corrente na região localizada próximo ao Farol da Conceição durante o período de 365 dias de simulação. A região com uma primeira turbina utilizada é apresentada, e os vetores em preto representam a direção das correntes. A escala de cores indica a intensidade das correntes em  $m.s^{-1}$ .....61

Figura 3.3 - Intensidade média da corrente na região localizada próximo ao Farol da Conceição durante o período de 365 dias de simulação. A região com as três turbinas utilizadas é apresentada, e os vetores em preto representam a direção das correntes. A escala de cores indica a intensidade das correntes em  $m.s^{-1}$ .....62

Figura 3.4 - Intensidade média da corrente na região localizada próximo ao Farol da Conceição durante o período de 365 dias de simulação. A região com as cinco turbinas utilizadas é apresentada, e os vetores em preto representam a direção das correntes. A escala de cores indica a intensidade das correntes em  $m.s^{-1}$ .....63

Figura 3.5 - Intensidade média da corrente na região localizada próximo ao Farol da Conceição durante o período de 365 dias de simulação. A região com as sete turbinas utilizadas é apresentada, e os vetores em preto representam a direção das correntes. A escala de cores indica a intensidade das correntes em  $m.s^{-1}$ .....65

Figura 3.6 - Crescimento do sítio de conversores durante as simulações, começando com 1 conversor até os 7 conversores propostos para o estudo.....66

Figura 3.7 – Mosaico apresentando a potência média dos conversores em cada simulação. Os vetores em amarelo apresentam o sentido da corrente.....67

Figura 3.8 - Série temporal do sítio com 1 conversor durante a simulação de 365 dias.....68

Figura 3.9 - Séries temporais do sítio com 3 conversores durante a simulação de 365 dias.....69

Figura 3.10 - Séries temporais do sítio com 5 conversores durante a simulação de 365 dias.....70

Figura 3.11 - Séries temporais do sítio com 7 conversores durante a simulação de 365 dias.....72

Figura 3.12 - Intensidade média da corrente na região localizada próximo ao Farol da Conceição durante o período de 365 dias de simulação. A região com as sete turbinas utilizadas é apresentada, e os vetores em preto representam a direção das correntes. A escala de cores indica a intensidade das correntes em  $m.s^{-1}$ .....75

Figura 3.13 - Sítio com as 7 turbinas e o mapa de cores representando potência média convertida. ....76

Figura 3.14 - Séries temporais do sítio com 7 conversores durante a simulação de 365 dias.....77

Figura 3.15 - Gráfico apresentando o crescimento potencial alcançado em cada passo do trabalho. Em vermelho é apresentado o resultado obtido pela simulação de comparação..... 78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de turbinas com eixo horizontal Rourke et al. (2010) .....	28
Tabela 2 - Exemplo de turbinas com eixo vertical, Rourke et al. (2010).....	29
Tabela 3 - Hidrofólio Oscilante, Rourke et al. (2010) .....	30
Tabela 4 - Interior de Dutos Venturi, Fischer (2014) .....	30
Tabela 5 - Parâmetros Técnicos da Turbina .....	53
Tabela 6 - Tabela de valores: máximo, média, desvio padrão e valor integrado em $W$ para a série temporal do sítio com 1 conversor.....	71
Tabela 7 - Tabela de valores: máximo, média, desvio padrão e valor integrado em $W$ para a série temporal do sítio com os 3 conversores. ....	71
Tabela 8 - Tabela de valores: máximo, média, desvio padrão e valor integrado em $W$ para a série temporal do sítio com 5 conversores.....	72
Tabela 9 - Tabela de valores: máximo, média, desvio padrão e valor integrado em $W$ para a série temporal do sítio com 7 conversores.....	72
Tabela 10 - Tabela de valores: máximo, média, desvio padrão e valor integrado em $W$ para a série temporal do sítio com 7 conversores.....	76

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Módulo da Energia

A	Área da Turbina [ $m^2$ ]
$\eta$	Coefficiente de eficiência da turbina
$\rho$	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 [ $m$ ]
$\nu$	Coefficiente de viscosidade cinemática [ $m^2/s$ ]
$P, p$	Pressão [ $N/m^2$ ]
$\rho_0$	Densidade de referência [ $kg/m^3$ ]
$\Delta\rho$	Variação da densidade
S	Elevação da superfície livre do mar [ $m$ ]
$\omega$	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 [ $Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ]
$\nu$	Viscosidade Cinemática
$\bar{W}$	Intensidade do vento [ $m/s$ ]
$(\phi)$	Latitude em graus
$F_{\text{fonte}}$	Taxa de criação da fonte
$q$	Fluxo decorrente da difusão molecular ou turbulenta
$\nu_T$	Coefficiente de difusão
Q	Fonte ou sumidouro de traçador
$a_{\text{vento}}$	Coefficiente de influência do vento
T	Temperatura [ $K$ ]
m	Coefficiente de Manning
h	Profundidade da água [ $m$ ]
$z_f$	Profundidade local medida na malha [ $m$ ]
$z_s$	Elevação da superfície livre [ $m$ ]
$z^*$	Sistema Sigma
ti	Tempo inicial [ $s$ ]

$t_f$   
 $\Delta t$

Tempo final [s]  
Tempo total da simulação [s]

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EMEC	European Marine Energy Center
CHC	Canadian Hidraulic Centre
OCCAM	Circulation and Climate Advanced Modeling Project
ANA	Agência Nacional de Águas
NOAA	National Oceanic & Atmospheric Administration
HYCOM	Hybrid Coordinate Ocean Model

## 1. Introdução

As necessidades energéticas do homem estão em constante evolução. Para satisfazer suas primeiras necessidades, que eram basicamente a alimentação, uma fonte de iluminação noturna e aquecimento, o homem se apropriou do uso do fogo e desenvolveu a agricultura e a pecuária, armazenando energia excedente nos animais e alimentos (Fonseca, 1972; Hemer et al., 1993).

A partir de então, cada vez mais a humanidade pôde se dedicar a outras atividades para potencializar seu trabalho (Tessmer, 2002). Existem mais de 7 bilhões de pessoas em um planeta onde a mudança do estilo de vida da população é constante e esta mudança faz com que a dependência da humanidade pela energia seja cada vez maior. Em um mundo em constante desenvolvimento, a busca por fontes de energias limpas e renováveis que tenham baixo impacto ambiental é crescente.

O panorama mundial está mudando rapidamente, por motivos ligados a três das grandes preocupações da humanidade: meio ambiente, energia e economia global. Embora à primeira vista possam parecer distintas, estas três áreas estão, na realidade, completamente interligadas. As duas primeiras estão já há mais tempo na percepção do cidadão comum, devido ao efeito estufa e ao aquecimento global associado ao uso de combustíveis fósseis. Quanto à economia, só o tempo dirá quais os efeitos permanentes que esta crise no sistema financeiro terá sobre o setor energético e, mais difícil de prever, sobre o meio ambiente. A única coisa certa é de que os três setores serão permanentemente afetados (Vichi et al., 2009).

Atualmente as grandes potências mundiais mantêm investimentos fortes nas fontes de energias renováveis, mas não conseguem se tornar totalmente independentes das fontes de combustíveis fósseis. Para conseguir desenvolver um plano econômico sólido para o povo, seus líderes não podem depender apenas de um tipo de recurso energético. Sendo assim, os países vêm investindo na diversificação das fontes de energia como meio de ampliação da sua matriz energética.

Os recursos fósseis sempre foram a base para obtenção de energia e esse recurso monopolizava o desenvolvimento de novas tecnologias, sendo assim a sociedade não conseguia imaginar o que seria do mundo sem estes recursos. Mas hoje, os recursos investidos para o desenvolvimento de novas tecnologias voltado às fontes renováveis e a sustentabilidade têm mostrado como obter novas fontes de energia nos últimos anos. A Figura 1.1 mostra a progressão destes investimentos sendo possível observar o crescimento destes investimentos entre os anos de

2004 e 2015. Isto mostra a preocupação mundial em obter novos recursos em energia limpa e renovável.

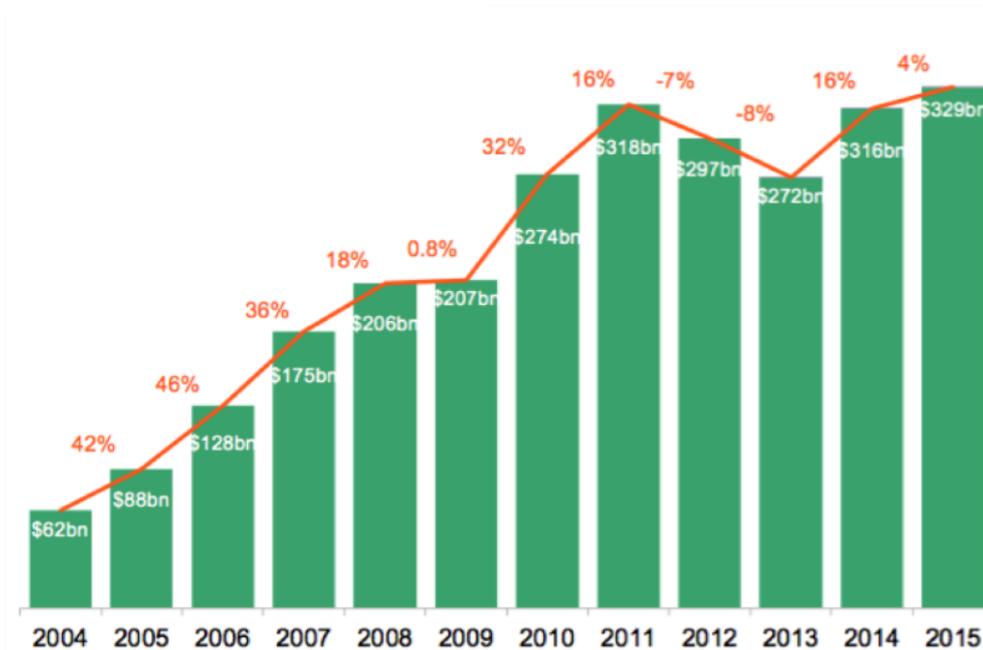


Figura 6.1 - Investimento mundial realizado entre os anos de 2004 e 2015 em energias renováveis, em bilhões de dólares (\$bn). Fonte: Bloomberg New Energy Finance

A preocupação mundial em expandir a matriz energética foi o que ocasionou a busca por um maior número de fontes de energias renováveis possibilitando assim sua maior diversificação.

O Brasil, em 2004, investia apenas 0,5 bilhões de dólares em energia renovável, já em 2012 este investimento foi de 5,4 bilhões de dólares. Este aumento nos investimentos permitiu que a energia eólica no Brasil e no mundo tivesse um expressivo crescimento em 16 anos segundo Report (2013), conforme mostrado na fig. 1.2.

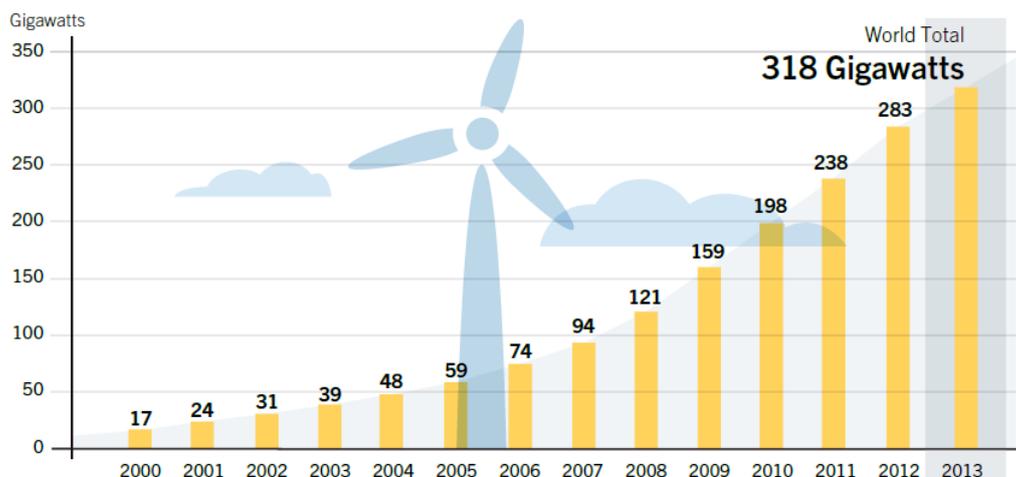


Figura 1.7 - Dados da geração de energia a partir de energia eólica de 1996 a 2012. Fonte: Report2013

Devido a abundância de água existente no planeta, pode-se compreender a importância de realizar pesquisas nos oceanos, de forma a utilizar seus recursos como fontes alternativas de energia. Entretanto, os oceanos foram pouco explorados como recurso energético, visto que os primeiros dispositivos só foram desenvolvidos a partir do século XVIII (Campos, 2013). Outra questão muito importante é que a dificuldade do uso das fontes de energias renováveis no mar não está relacionada ao tempo de estudos necessários dos recursos energéticos. As dificuldades de manutenção dos equipamentos e o ambiente agressivo e a conservação são aspectos bastante importantes também.

Dentro da diversificação de fontes de recursos energéticos renováveis para uma melhoria da malha energética, os oceanos surgem como uma das opções a serem estudadas. Opção que traz consigo uma grande variedade de sub fontes: energia das ondas, energia das marés, energia de correntes oceânicas, energia térmica dos oceanos e gradientes de salinidade (Campos, 2013).

As correntes de marés possuem velocidades relativamente baixas se comparadas com a velocidade do vento. Entretanto, a densidade da água é mais de 800 vezes o valor da densidade do ar. Se comparadas as equivalências de velocidades de uma fonte para outra, quando o fluxo de água atinge a velocidade de 2 m/s no ar a velocidade será de 18 m/s (Leijon e Lundin, 2005).

As marés produzem fluxos com grande intensidade, que são chamados de correntes de maré, e podem ser utilizados para a geração de energia. Tais correntes são causadas pela atração gravitacional entre o Sol e a Lua. Esta atração possui vários padrões que influenciam diretamente nas correntes de maré. A identificação destes padrões permite a observação das características que definem as condições de máxima geração de energia (Twidell e Weir, 2006).

Diferentemente das correntes de marés, as correntes oceânicas são geradas a partir de circulação oceânica, vazões de rios, movimento de marés e diferenças de níveis de temperatura e salinidade (Rourke et al., 2010).

Sobre o aproveitamento da energia oceânica podem ser citadas cinco alternativas tecnológicas apresentadas por (Silva et al., 2014):

- Energia das correntes de maré e marinhas – utiliza instalações de turbinas que aproveitam o escoamento da água em locais onde existem correntes marinhas (sem a necessidade de barragens);
- Energia de gradientes de temperatura – utiliza águas quentes da superfície e frias do fundo do oceano que, com o auxílio de máquinas térmicas, produzem energia elétrica;
- Energia das marés – para isso há a necessidade de construção de barragens em locais onde exista um gradiente significativo entre os níveis alto e baixo da maré;
- Energia das ondas – aproveita a energia cinética ou potencial das ondas do mar utilizando vários dispositivos em desenvolvimento.

Uma importante motivação adicional para a realização deste trabalho é o fato de o uso das energias renováveis relacionadas ao mar representar uma contribuição importante para a demanda energética. Então o estudo numérico e racionalização do projeto de um arranjo de dispositivos também é uma motivação importante, sendo um objeto de estudo do presente trabalho.

### **1.1. Descrição da Área de Estudo**

Os continentes são as principais fronteiras dos oceanos e as características da linha de costa e do fundo oceânico influenciam o movimento das águas. Sendo assim é importante saber as divisões do fundo oceânico que são: a costa, a plataforma continental, o talude continental e o assoalho oceânico profundo (Assad et al., 2009).

A plataforma continental se estende da costa em direção ao oceano com um gradiente vertical médio de profundidade de 1 por 500, onde a profundidade aumenta 1 m a cada 500 m de distância (Assad et al., 2009). O limite externo da plataforma, chamado de quebra da plataforma, é

localizado na região onde a inclinação do fundo apresenta gradientes que podem ser de 1 por 20 (Assad et al., 2009). A partir desta região, tem início o Talude continental, região de forte inclinação no fundo oceânico. A plataforma continental apresenta uma distância média em relação à costa de cerca de 65 km e uma profundidade média de aproximadamente 130m (Assad et al., 2009). A figura 1.3 ilustra as subdivisões da plataforma continental.

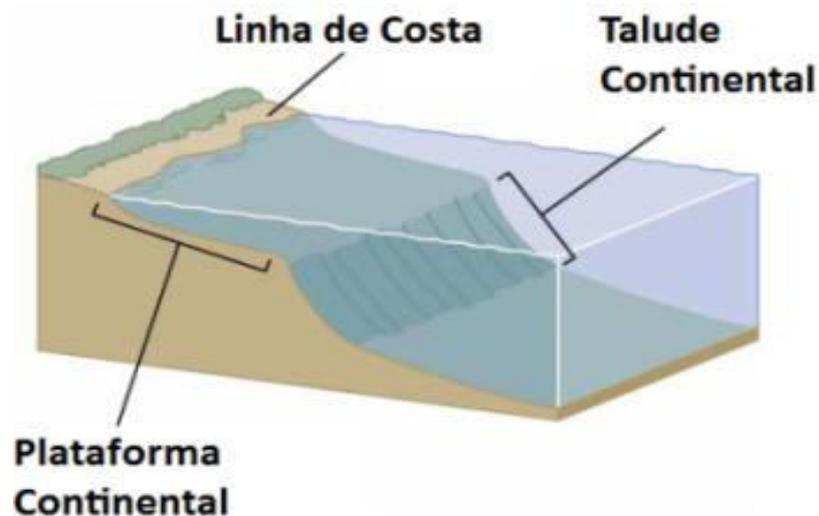


Figura 1.8 - Oceano e suas divisões de fundo. Fonte: [www.cienciaviva.pt](http://www.cienciaviva.pt)

A Plataforma Continental do Sul do Brasil (PCSB) (Figura 1.4), está localizada entre o Cabo de Santa Marta (28°S) e o Chuí (35°S). Na região da PCSB ocorre o encontro de massas de águas de origem tropical, as águas de origem subantártica e do aporte continental, que, através de suas distintas características, tornam a região dinâmica e com grande contraste termohalino.

A circulação desta plataforma é influenciada pelas marés (Matano et al., 2010) e intensos aportes de água doce (Piola et al., 2005), sendo o estuário do Rio da Prata a maior fonte de água doce para a plataforma continental na região sudoeste do Atlântico Sul. De acordo com Piola et al. (2004), o Rio de Prata tem uma descarga média de  $23.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  e picos que chegam a mais de  $60.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  em anos de eventos El Niño (Piola et al., 2005). Outra descarga importante de água doce na plataforma continental é a da Lagoa dos Patos, cuja desembocadura está próxima da latitude de 32°S. Esta laguna tem uma importante contribuição continental com uma descarga média de  $2.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  que pode alcançar picos de  $12.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  também em anos de evento El Niño

(Möller e Castaing, 1999). Eventos de descarga extrema foram observados por (Marques, 2012), chegando a  $16.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  nos anos de 1940 no inverno.

A região ainda possui uma alta variabilidade sazonal e interanual no campo de ventos (Piola et al., 2005; Braga e Krusche, 2000), onde ventos de quadrante norte, dominantes no verão, forçam um deslocamento das massas de águas costeiras para o sul e ventos de quadrante sul, dominantes no inverno, geram um deslocamento das mesmas para o norte. O padrão de ventos sobre a região costeira é determinado pela influência do anticiclone do Atlântico Sul em escala sazonal, pela presença de sistemas meteorológicos em escala sinótica e pelo sistema de brisa costeira (Braga e Krusche, 2000).



Figura 1.15 - Plataforma Continental Sul do Brasil. Fonte: Palma et al. (2008)

Os ventos predominantes na costa do Rio Grande do Sul são de origem Nordeste (NE) 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 o verão e mais fraco no inverno, quando o anticiclone se desloca para zonas de baixa latitude (Möller et al., 2008; Piola et al., 2005), possibilitando a entrada de um maior número de frentes meteorológicas e o aumento na frequência de ocorrência de ventos de Sudoeste (SO). A influência da maré é mínima na região costeira do Rio

Grande do Sul, descrita como de predominância diurna (Fernandes et al., 2004; Möller et al., 2007), em um regime de micro marés.

Marques et al. (2012) realizaram estudos sobre a influência da instalação de turbinas hidrocinéticas, identificando as possíveis alterações nos processos naturais hidrodinâmicos e morfodinâmicos desta 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.

Estudos realizados posteriormente por Kirinus et al. (2012); Marques et al. (2012); Kirinus e Marques (2015); Kirinus et al. (2015), identificaram dois locais com maior probabilidade de implantação de sítios de conversão de energia dentro da PCSB, os locais são apresentados em destaque na figura 1.5. Estes locais se encontram na região norte - compreendido entre Solidão e o sul do Farol da Conceição - e na região sul, que foi definida desde o Sarita, ao norte, e o sul do Albardão.

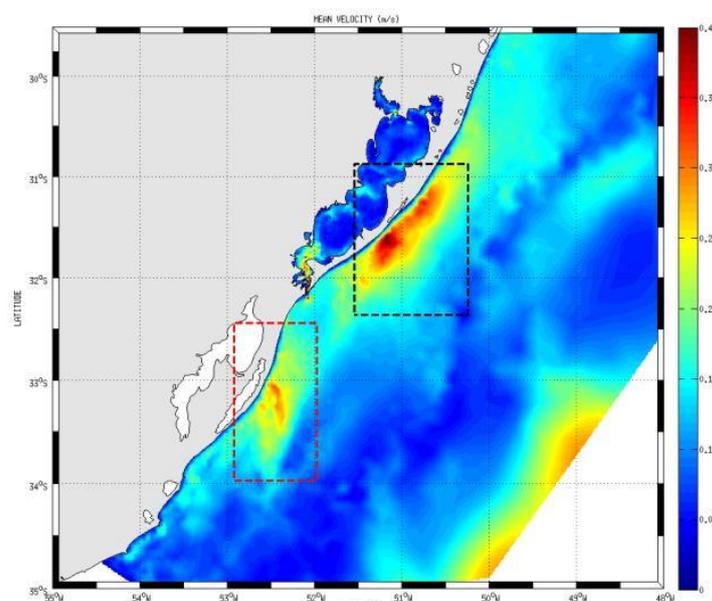


Figura 1.16 - Locais encontrados para implantação de sítios de conversão de energia na PCSB. Fonte: Kirinus et al. (2012)

Nas análises realizadas nestes estudos, as duas regiões apresentaram altos valores médios de corrente, entretanto, este valor médio está associado a uma alta variabilidade, e desta forma, o desvio padrão da velocidade de corrente apresentou a mesma ordem de grandeza dos valores médios. Os resultados sugeriram que, ao mesmo tempo em que estas regiões são propícias a conversão de energia elétrica, estas também podem passar por períodos de baixa geração energética.

Os autores identificaram que a região norte é mais propícia à conversão de energia visto que apresenta menores desvios com relação aos valores médios, além de possuir uma batimetria mais regular. Com base nos resultados obtidos por Kirinus et al. (2012); Marques et al. (2012); Kirinus e Marques (2015); Kirinus et al. (2015), este trabalho terá enfoque na região norte, próximo ao Farol da Conceição, mesmo sabendo que as duas regiões são propícias ao desenvolvimento de um sítio de conversão de energia de correntes.

## 1.2. Estado da arte

Existem vários tipos e protótipos de turbinas sendo desenvolvidas no mundo, e muitas delas já foram testadas e obtiveram um bom desempenho. Porém, estudos que analisam o comportamento e o desempenho de sítios com mais de um conversor em ambientes reais ainda não são frequentes. Os resultados deste estudo mostraram que o comportamento da corrente em relação aos conversores sofre alteração, tanto de curso quando na intensidade, em decorrência do aumento da esteira que se desenvolve quando a corrente passa pelos conversores de energia de correntes.

Stansby e Stallard (2016) analisaram este efeito esteira que ocorre sempre que um fluxo passa pelos conversores. O estudo destes autores foi realizado em laboratório com linhas de conversores (3 e 4 conversores) em 2, 3 ou 4 linhas, para analisar o efeito esteira comparando uma linha de conversores com a outra. Porém, este estudo não foi realizado com simulações reais e sim em escoamentos constantes e controlados, para a análise do déficit de velocidade que ocorre com a criação de esteiras no escoamento entre os conversores.

Neste estudo os autores chegaram à conclusão que o método de superposição do déficit de velocidades para esteiras em matrizes de turbinas mostra uma boa previsão entre o valor da velocidade combinada com o déficit da velocidade criada pela esteira, considerando as medidas experimentais. Eles também chegaram a conclusão que o método de superposição é relativamente simples e que a otimização da posição dos conversores para a geração de energia é computacionalmente eficiente.

Em outro estudo, Roc et al. (2014) analisaram o posicionamento de conversores e o efeito que as esteiras criadas tem sobre os conversores. Este estudo também foi realizado em laboratório, onde

se estimou a melhor distância entre os conversores para que a esteira criada não influenciasse nos outros conversores.

Eles desenvolveram dois experimentos de escalas físicas, o primeiro formado com uma linha de dois conversores implantados em um canal retangular, e o segundo com um desenho de duas linhas e 3 dispositivos, onde a linha da frente é composta por dois dispositivos e um único dispositivo à jusante.

A localização do dispositivo a jusante foi deliberadamente escolhida no ponto médio entre os dois dispositivos à montante, a fim de explorar a aceleração do fluxo que ocorre nesta área. O objetivo dos autores era reproduzir interações para análise da esteira e a aceleração do fluxo entre os dispositivos em ambos os casos.

Os resultados deste permitiram concluir que este tipo de abordagem de avaliação de sítios de conversão de energia levanta uma questão de estratégia de otimização da matriz de conversores. Baseada na maximização da captura de energia, os resultados revelaram que a simulação de cada linha de montante é necessária para avaliar os impactos nas linhas de jusante (Roc et al., 2014). A figura 1.6, mostra alguns dos resultados apresentados pelos autores.

Um outro estudo que pode ser utilizado na discussão destes resultados foi um realizado por Pezzato et al. (2015). Este estudo foi realizado na PCSB, na mesma área em que este trabalho está sendo desenvolvido, porém, no estudo de Pezzato et al. (2015) os autores utilizaram duas linhas de cinco conversores rotacionando o sítio em relação à linha de costa. A figura 1.7, mostra como foi disposto o sítio de conversores de energia em cada um dos cenários simulados.

Um dos resultados obtidos por estes autores foi que atrás das turbinas pode ser observada uma zona de sombra (efeito esteira), formando vórtices que se deslocam com uma velocidade menor, e que podem interferir nas turbinas adjacentes diminuindo o potencial de energia total (Pezzato et al., 2015). Os autores conseguiram observar que no cenário 1, onde os conversores foram alinhados no sentido da corrente, houve uma diminuição no potencial de conversão das turbinas em decorrência da formação desta esteira. Este resultado foi observado nos outros cenários, em que algumas turbinas tinham um potencial de conversão maior em relação as outras, pelo posicionamento em relação a corrente e por não sofrer influência das zonas de sombra que se criaram com a passagem do fluxo pelos conversores.

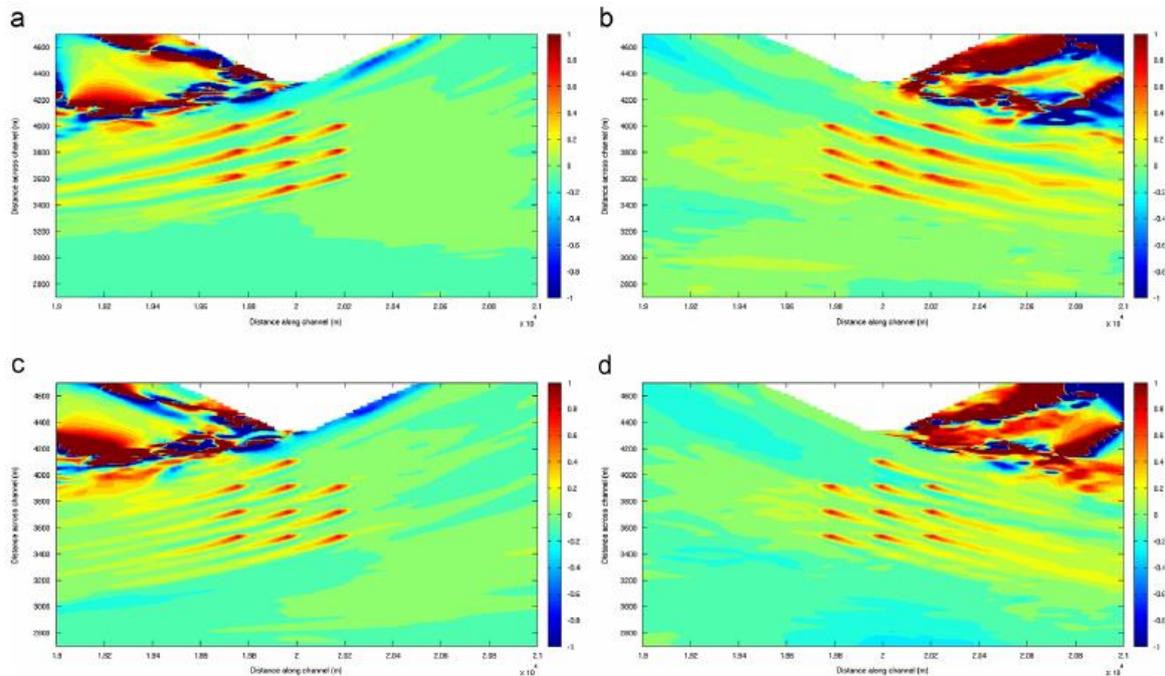


Figura 1.6 - Resultado das simulações realizadas no estudo de Roc et al. (2014) mostrou que o posicionamento intercalado dos conversores dentro do sítio proporcionou um ganho maior de conversão do que quando implantados um após o outro em linhas contínuas.

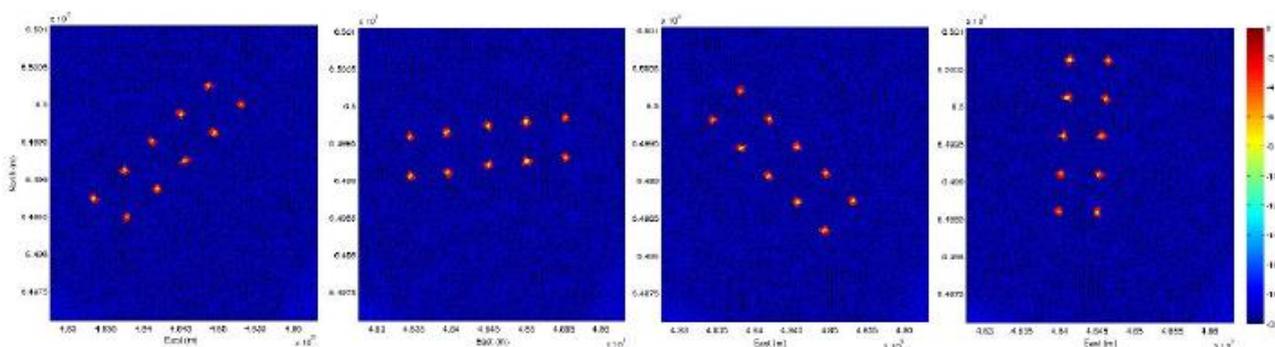


Figura 1.7 - Da esquerda para direita, cenários 1, 2, 3 e 4 do estudo realizado por Pezzato et al. (2015) na PCSB mostrou que mesmo em diferentes posições, os conversores que estivessem posicionados atrás de outro conversor em relação ao fluxo da corrente, estes perdiam potência de conversão por não receber a mesma intensidade de fluxo.

Levando em consideração os resultados que estes estudos obtiveram, e discutindo os mesmos com relação aos resultados apresentados neste estudo, um dos objetivos foi de alcançar a melhor configuração da matriz de conversores, sem sofrer a influência desta zona de sombra que os estudos verificaram.

Desta forma, a utilização das zonas de maior intensidade de corrente à jusante dos conversores para alcançar um maior potencial de conversão pelas turbinas, permitiu um melhor aproveitamento espacial e um maior aumento do potencial energético.

De fato, a verificação que pode ser realizada neste trabalho, em relação aos outros, é que a implementação de sete conversores na área do sítio foi conseguida de forma a minimizar a influência da esteira criada pelos outros conversores, pois a mesma é capaz de gerar energia em todas as direções em que o escoamento passa pela turbina.

### 1.3. Utilização das correntes oceânicas na conversão de energia elétrica

Atualmente, a energia proveniente das marés tem sido explorada principalmente para a geração de eletricidade. Pode ser estimado que o potencial energético global seja da ordem de 500 a 1.000  $TWh.ano^{-1}$  (Hammons, 1993). Embora este valor seja significativo, no mundo existem poucos lugares com amplitude de marés significativas, além de outras condições geográficas adequadas a este tipo de exploração. A figura 1.8 mostra os principais locais do planeta onde os aproveitamentos maremotrizes são mais apropriados.



Figura 1.8 - Locais com maior aproveitamento maremotriz no mundo. Fonte Neto et al. (2011)

Um dos locais de maior destaque em termos de potencial utilizável é o Reino Unido, onde se estima cerca de  $18 \text{ TW}\cdot\text{h}$  em aproveitamentos disponíveis (Charlier e Finkl, 2009). Ainda, existem alguns locais na América do Sul, como a costa norte do Brasil ou do Chile, por exemplo. Neste último, pode ser estimado um potencial utilizável de pelo menos  $500 \text{ MW}$  (Corporation, 2010).

O Projeto SeaGen é um dos principais exemplos de aproveitamentos das correntes de marés. Em 2008, um conversor de  $1,2 \text{ MW}$  foi instalado em Stranford Lough, Reino Unido. O diâmetro do rotor é de  $16 \text{ m}$ , sendo capaz de gerar anualmente cerca de  $3800 \text{ MWh}$ . A velocidade nominal da turbina é de apenas  $2,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Siemens, 2012)<sup>2</sup>. A figura 1.9 e 1.10 ilustra um dos tipos de conversores e mostra o princípio do seu funcionamento, onde se tem uma velocidade inicial a qual chamamos de ( $v_1$ ), esta velocidade faz com que as pás do conversor entrem em movimento e com isso ela perde intensidade ao passar pela turbina ( $v_2$ ) e após um período esta velocidade tende a voltar ao normal ( $v_3$ ).

A companhia Hammerfest Strom desenvolveu o projeto chamado Blue Concept, ilustrado na figura 8, que consiste em um protótipo pré comercial de turbinas de até  $1 \text{ MW}$  de potência nominal para o aproveitamento das correntes das marés. Com o objetivo de reduzir os custos da geração maremotriz, a companhia pretende testar seus protótipos em Islay e Ducany, Escócia, através de matrizes com potências nominais de  $10 \text{ MW}$  e  $95 \text{ MW}$ , respectivamente (Hammerfest Strom, 2011). O princípio de funcionamento deste conversor é o mesmo exemplificado na (figura 9).

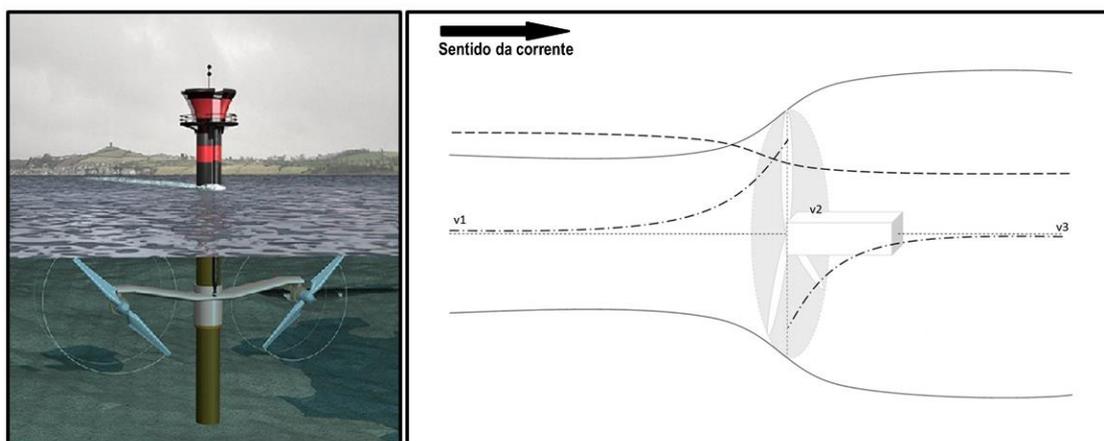


Figura 1.9 - Ilustração de uma turbina utilizada para conversão da energia cinética das correntes de maré em eletricidade - SeaGen. Fonte: <http://www.seageneration.co.uk/history.php>

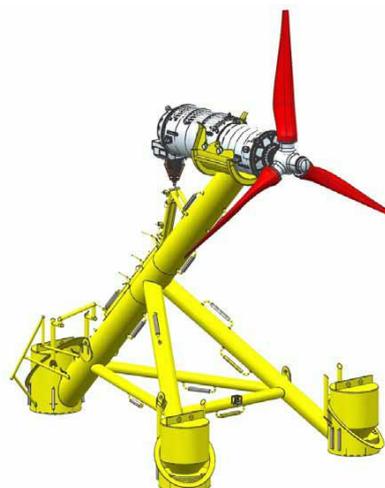


Figura 1.10 - Exemplo de uma turbina no modelo Blue Concept. Fonte: Hammerfest Strom (2011)

A energia cinética das correntes marinhas pode ser convertida usando técnicas relativamente convencionais, seguindo princípios de extração similares aos usados em energia eólica, utilizando vários tipos de rotores abertos (Ponta e Jacovkis, 2007). Entre as técnicas que são utilizadas na exploração das correntes marinhas, a mais comum utiliza uma turbina, posicionada na direção normal ao escoamento, montada sobre uma plataforma flutuante ou em uma base submersa.

Como os dispositivos para o aproveitamento das correntes marinhas são submersos, seu desenvolvimento deve ter especificações que permitam conseguir um longo período de operação e pouca manutenção. Desta forma, para que o desenvolvimento destes projetos tenha êxito, são necessários estudos e investigações de várias opções para a utilização da tecnologia apropriada, tendo em vista qual o local onde será implantado o projeto e qual a melhor configuração para otimizar o trabalho.

Entre os vários requisitos exigidos, o projeto de um dispositivo que irá atuar em águas oceânicas, deve considerar o rigor do ambiente marinho com ocorrência de eventos extremos, o sistema de vedação dos mecanismos do equipamento, a corrosão devido à solução salina, a existência de plantas aquáticas, a possibilidade de choques com lixo e objetos jogados ao mar e o cuidado com a vida marinha. Além disso, devido à alta densidade da água marinha, as cargas sofridas pelo dispositivo podem ser bastante grandes. Desta forma, a estrutura do equipamento deve ser ancorada e projetada para resistir às cargas e sem falhas (Ponta e Jacovkis, 2007).

Atualmente, o EMEC (European Marine Energy Center), lista mais de 80 tipos diferentes de dispositivos para o aproveitamento de correntes oceânicas. Sendo que alguns destes dispositivos já

estão instalados e gerando energia, mas a grande maioria está em fase de projetos ou na fase de testes de protótipos. Os principais países que estão desenvolvendo tecnologia e pesquisa nesta área são: o Reino Unido, os Estados Unidos, a Holanda e a Noruega. Outros países como a França, a Alemanha, a Austrália, o Canadá, a Nova Zelândia, a Suécia, a Espanha e a Itália, também possuem projetos em andamento.

Segundo o EMEC (European Marine Energy Center), os dispositivos projetados para o aproveitamento de energia das correntes oceânicas podem ser classificados pelo seu princípio de funcionamento: (a) turbinas de eixo horizontal, (b) turbinas de eixo vertical, (c) hidrofólios oscilantes, (d) turbinas instaladas no interior de dutos Venturi e (e) outros princípios distintos.

As turbinas horizontais são similares às turbinas eólicas, onde o fluxo é axial ao rotor. Protótipos destas turbinas de até 10 *kW* foram construídos e testados usando este conceito. Há atualmente algumas plantas a serem instaladas, uma delas na costa sul do Reino Unido usando uma máquina da demonstração de 300 *kW* (Defne, 2010).

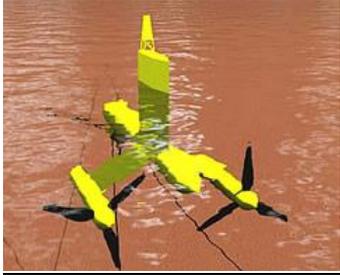
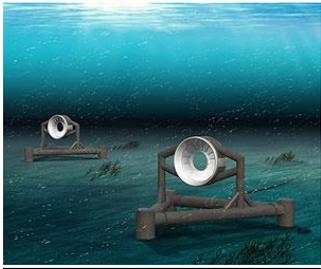
#### - Turbina de eixo horizontal

O funcionamento deste tipo de turbina é baseado na conversão da energia cinética das águas em energia elétrica. Esta conversão é o resultado do movimento de rotação causada pela incidência das águas nas pás da turbina, que converte a energia cinética das águas em potência mecânica rotacional no eixo do rotor. Esta potência mecânica é então transmitida ao gerador, que através de um processo de conversão, produz uma potência elétrica de saída.

Nas turbinas de eixo horizontal, a transmissão mecânica do torque da turbina normalmente é realizada através de caixa de engrenagens. Já a conversão da energia mecânica em energia elétrica é feita através de gerador de indução ou de ímã permanente, existindo casos onde se faz o uso de dínamos, tais como os usados em navios de propulsão (Fischer, 2014).

O EMEC (European Marine Energy Center), lista em torno de 40 turbinas de eixo horizontal, sendo que algumas destas turbinas estão implantadas, outras estão em fase de testes de protótipo ou ainda na fase inicial de projeto, algumas destas turbinas podem ser observadas na tabela 1.

Tabela 1 - Exemplo de turbinas com eixo horizontal Rourke et al. (2010)

Dispositivo	Características Principais
<p style="text-align: center;"><b>Evopod</b></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Projeto desenvolvido pela empresa irlandesa OpenHydro.</li> <li>- Velocidade mínima do fluxo: 1m/s.</li> <li>- Diâmetro da turbina: Vários diâmetros (protótipo -1,5m).</li> <li>- Fixado através de amarradouro flexível ancorado por meio de cabos, permitindo instalação rápida.</li> <li>- Testes e estudos mostraram que em um quilômetro quadrado de área no mar podem ser instaladas 39 turbinas com 1,5m que fornecem uma saída avaliada em aproximadamente 58,5 MW.</li> <li>- 2008 – Primeiro teste com protótipo na escala 1/10 em Strangford Narrows, na Irlanda do Norte.</li> <li>- 2012 - Planejamento para instalação de um protótipo na escala 1/4, com potência nominal de 37kW conectado à rede elétrica.</li> <li>- Fonte: <a href="http://www.oceanflowenergy.com">www.oceanflowenergy.com</a>(acesso em maio/2016).</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Open Centre Turbine</b></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Projeto desenvolvido pela empresa irlandesa OpenHydro.</li> <li>- Poderá ser fabricado com diâmetros de 6m ou de 16m.</li> <li>- A montagem no leito marinho para turbina com diâmetro de 6m é projetada com 2 pilares. Para turbina com diâmetro de 16m, a estrutura é feita com 3 pilares e lastro.</li> <li>- Profundidade do local de instalação: 35m.</li> <li>- A primeira turbina foi instalada para testes na Escócia, em Orkney, com o apoio do EMEC em 2007.</li> <li>- Em 2011, a parceria entre a empresa de energia EDF da França e o fabricante OpenHydro, após 3 anos de projeto, começaram a instalação das primeiras quatro turbinas, com 16m de diâmetro, ao largo da costa Paimpol-Bréhat, na França. A previsão para conexão com a rede elétrica é para 2012, para geração de 2MW.</li> <li>- Fonte: <a href="http://www.openhydro.com">www.openhydro.com</a> (acesso em maio/2016)</li> </ul>

Como a massa específica da água é maior que a do ar, e tendo em vista que o funcionamento deste tipo de turbina é semelhante as turbinas eólicas, as pás da turbina podem ser menores e seu movimento mais lento. Por esse motivo, as pás não necessitam ser tão grandes e como seu trabalho ocorre com baixas rotações, os riscos aos animais marinhos são pequenos (Fischer, 2014).

Existem alguns tipos de bases de sustentação que podem ser utilizadas para fixar este tipo de conversor. Ele pode ser fixado através de pilares fundeados ao leito marinho, também podem ser utilizadas estruturas de lastros junto ao leito ou estruturas flutuantes fixas através de cabos. Porém, um estudo deve ser analisado para saber qual a melhor forma de fixar a turbina, pois a fixação destes dispositivos pode envolver perfurações que acabam acumulando matérias que, por sua vez, podem causar danos a flora e a fauna do local (Fischer, 2014).

### - Turbina de eixo vertical

O funcionamento das turbinas de eixo vertical tem o mesmo fundamento da turbina com eixo horizontal, porém com a diferença da orientação do eixo. O EMEC (European Marine Energy Center), lista 16 tipos de turbinas de eixo vertical que estão em fase de projeto ou em funcionamento e esta diversidade de turbinas mostra que ainda não existe uma tecnologia dominante para a abordagem deste problema. A maioria dos projetos das turbinas de eixo vertical são inspiradas nos moinhos com eixo vertical que foram inventados pelo francês George Darrius, na década de 30. A tabela 2 mostra dois exemplos deste tipo de turbina.

Tabela 2 - Exemplo de turbinas com eixo vertical, Rourke et al. (2010)

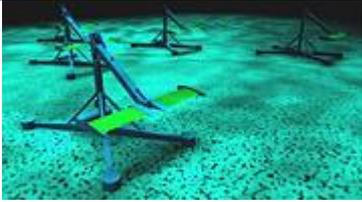
Dispositivo	Características Principais
<p data-bbox="225 999 443 1028"><b>Gorlov Turbine</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O projeto foi desenvolvido por Alexander Gorlov, professor de engenharia mecânica da Northeastern University em Boston.</li> <li>- O protótipo foi construído com diâmetro do rotor com aproximadamente 1,0 m.</li> <li>- Rotor com 3 pás.</li> <li>- Foram realizados testes de protótipo em Vinalhaven, na costa de Maine e no Rio Amazonas/Brasil.</li> <li>- Fonte: <a href="http://www.gcktechnology.com">http://www.gcktechnology.com</a> (acesso em maio/2016).</li> </ul>
<p data-bbox="256 1290 411 1319"><b>Encurrent</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desenvolvida pela empresa Canadense New Energy Corporation.</li> <li>- Equipamento indicado para operar em estuários, rios e canais. Velocidade mínima de fluxo: 1,5 m/s.</li> <li>- A turbina é acoplada a um gerador de ímã permanente, localizado na superfície da água.</li> <li>- A estrutura é flutuante. As turbinas são fabricadas para diferentes potências: 5; 10; 25; 125 e 250 kW, por isso existem diferentes diâmetros de rotores.</li> <li>- Várias unidades já estão em funcionamento e prontas para comercialização.</li> <li>- Fonte: <a href="http://www.newenergycorp.ca">http://www.newenergycorp.ca</a> (acesso em maio/2016)</li> </ul>

### - Hidrofólios Oscilantes

Uma outra alternativa de dispositivo de conversão de energia através das correntes são os do tipo Hidrofólios Oscilantes. Esse tipo de conversor oferece uma grande vantagem para águas rasas se comparadas com as turbinas convencionais, tendo em vista que a extração de energia através deste tipo de conversor é alcançada através de pás retangulares. A potência nominal deste tipo de conversor pode ser aumentada apenas com o acréscimo da extensão da pá. Além disso, as superfícies hidrodinâmicas, tem geometria e fabricação mais simples, quando comparadas com as

turbinas convencionais Kinsey et al. (2010). Um exemplo deste tipo de dispositivo é mostrado na tabela 3.

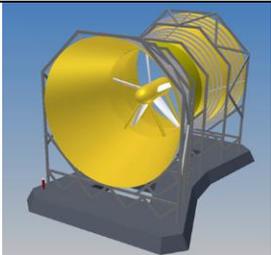
Tabela 3 - Hidrofólio Oscilante, Rourke et al. (2010)

Dispositivo	Características Principais
<b>Stingray Tidal Stream Generator</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dispositivo desenvolvido nos Estados Unidos.</li> <li>- Consiste em um hidrofólio que tem seu ângulo de ataque relativo a direção da corrente e que pode ser variado por um mecanismo. Isto faz com que o braço de apoio oscile forçando cilindros hidráulicos a um movimento alternativo. O sistema hidráulico aumenta a pressão do óleo, permitindo o funcionamento de um gerador.</li> <li>- Fonte: <a href="http://www.engb.com">www.engb.com</a> (acesso em maio/2016)</li> </ul>

#### - Interior de Dutos Venturi

O dispositivo do tipo Venturi utiliza características da diferença de área para gerar energia. Este tipo de dispositivo é composto por um estreitamento no seu interior onde o fluxo, ao entrar por este estreitamento, sofre uma perda de pressão e um subsequente aumento de velocidade. Estes dois fatores são utilizados para: a) aspirar o ar (para o caso de turbinas fora da água) ou b) aumentar o fluxo de água através de uma turbina (o caso da turbina em volta do orifício). Os dispositivos com orifício no meio e turbina em volta podem (tabela 4) ser classificados também como dispositivos de turbina de eixo horizontal, apesar do efeito Venturi, Campos (2013).

Tabela 4 - Interior de Dutos Venturi, Fischer (2014)

Dispositivo	Características Principais
<b>RTT - Rotech Tidal Turbine</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A fixação é feita através de um sistema com lastros, sem perfuração do leito marinho.</li> <li>- Diâmetro do duto Venturi: 15 m.</li> <li>- Diâmetro da turbina: 11,5 m</li> <li>- Comprimento: 19,2 m.</li> <li>- Profundidade do local para instalação: 40 m</li> <li>- Consiste em uma turbina bi-direcional de eixo horizontal instalada no interior de um duto Venturi simétrico, projetada pela empresa Lunar Energy, do Reino Unido.</li> <li>- Fonte: <a href="http://www.lunarenergy.co.uk">www.lunarenergy.co.uk</a> (acesso em maio/2016)</li> </ul>

### - Estudos da conversão de energia marinha

Em um estudo realizado por Luznik et al. (2013), foram feitas experiências com uma turbina de corrente de eixo horizontal com três pás em um tanque, com e sem presença de ondas na superfície, para analisar o desempenho da turbina. As características apresentadas nos resultados foram semelhantes em ambos os casos, no entanto existe um impacto significativo no poder de produção e carregamento das lâminas da turbina quando existem ondas de superfície. Isto foi especialmente evidente na medição de torque, que mostraram uma correlação com a velocidade vertical e a velocidade da onda, com uma variabilidade significativa durante o período de diminuição da velocidade vertical. Isto demonstra um equilíbrio inerente no posicionamento da turbina na coluna de água, de forma que a densidade de energia do fluxo é maior na superfície livre.

A partir deste estudo foi possível analisar que mesmo que a densidade da energia do fluxo seja maior na superfície livre, a colocação da turbina perto da superfície livre deve ser analisada pois aumenta a probabilidade de cavitação. O posicionamento da turbina em relação a coluna de água deve ser observado pois os efeitos das ondas persistem em profundidades significativas e podem contribuir para a velocidade de cisalhamento na região da camada limite do fluxo (Luznik et al., 2013).

De forma geral, os estudos mostram que as ondas de superfície podem afetar adversamente o desempenho de uma turbina, de forma que é preciso analisar e observar esse tipo de situação ao projetar uma turbina para um sítio específico. As marés desempenham um papel muito importante na formação dos climas globais, bem como com os ecossistemas para os habitantes do mar. Ao mesmo tempo, a maré tem um potencial substancial de fontes de energia limpa e renovável para as futuras gerações humanas (Gorlov, 2001).

Em um estudo realizado em 2010 foi verificado um possível potencial de conversão da energia das marés de  $8 \text{ kW.h}^{-1}$ , com uma turbina instalada no rio Altamaha localizado à sudeste dos Estados Unidos. Com uma turbina de  $5 \text{ m}$  de diâmetro foi constatado que a potência integral anual gerada poderia chegar a  $71 \text{ MW.Ano}^{-1}$  (Defne, 2010).

Um problema que deve ser abordado é como e onde deve ser utilizada a energia elétrica gerada pela extração das correntes das marés. As marés são cíclicas e a saída de potência correspondente de um sítio de conversores nem sempre coincide com o pico da atividade humana. Em países desenvolvidos, usinas de energia das marés podem ser parte da distribuição geral do sistema de energia. No entanto, existe a necessidade desta energia ser transmitida a uma longa

distância, pois as localizações das altas marés são geralmente longe dos centros industriais e urbanos (Gorlov, 2001).

Para a implementação deste tipo de sistema é necessária uma situação geográfica favorável e uma amplitude de maré relativamente grande, que varia de local para local. O Brasil apresenta condições favoráveis à implementação deste sistema em locais como o litoral maranhense, em que a amplitude dos níveis das marés chega a oito metros (Alager, 2016).

Dentro da PCSB, Marques et al. (2012) investigaram e concluíram que esta área de estudo tem grande potencial energético, pois através de simulações de 482 dias os autores alcançaram valores médios e máximos de aproximadamente 3 e 79 *MW* de energia elétrica. Considerando um conjunto de 6 turbinas com 20 *m* de raio, foi estimado uma taxa de conversão anual de aproximadamente 5 *GW.Ano*<sup>-1</sup>, para energia elétrica convertida através da circulação oceânica.

No mesmo local Kirinus et al. (2012), analisaram um sítio de conversão com 10 turbinas, alinhadas com a linha da costa e distantes um do outro a 200 *m* em todas as direções. Foi observado uma simulação de 280 dias, onde a média dos 10 conversores produziu cerca de 4,0 *MWh*, o valor máximo de conversão do sítio foi de 227,9 *MWh* e de forma integrada as 10 turbinas geraram 274,3 *GWh* durante o período simulado.

Um outro estudo realizado por Pereira et al. (2014), analisaram esta área com apenas um conversor. Neste estudo os autores observaram que um conversor poderia gerar de potência média um valor de 10 *kW/dia*, chegando a uma conversão de energia integrada de 3,5 *MW/ano*.

Outros estudos realizados por Kirinus et al. (2014); Kirinus e Marques (2014); Kirinus et al. (2015); Pezzato et al. (2015), analisaram e observaram esta área de estudo. Em todos estes estudos, os autores concluíram que existe um grande potencial energético neste local. Cada um dos estudos obteve resultados expressivos em cada uma das suas simulações e métodos utilizados para estimar a taxa de conversão de um sítio neste local. Contudo, em nenhum dos trabalhos anteriores foi aplicado o método Design Construtal para avaliação da configuração geométrica de um arranjo de turbinas inserido neste sítio.

Sendo assim, após as considerações analisadas e tendo em vista a viabilidade de um estudo na área encontrada na PCSB, este trabalho procura encontrar qual a melhor configuração da matriz de turbinas de conversores, levando em consideração a hidrodinâmica da área e uso do design construtal para definir as melhores posições para cada conversor.

## 1.4. Modelagem Computacional

A modelagem e simulação computacional são uma área de conhecimento multidisciplinar que trata da aplicação de modelos matemáticos para a análise, compreensão e estudos da fenomenologia de problemas complexos em áreas abrangentes como as engenharias, ciências exatas, biológicas, humanas, econômicas e ciências ambientais (Tanenbaum, 2001).

Algumas áreas onde a modelagem computacional pode ser aplicada:

- Desenvolvimento de produtos industriais;
- Pesquisas científicas básicas e aplicadas;
- Simulações e previsões temporais e espaciais de fenômenos matemáticos, físicos e químicos;
- Engenharia e tecnologia, biologia e saúde, meio ambiente e ecologia;
- Oceanografia e geofísica, dentre outros.

Problemas complexos resultam no aumento da quantidade de variáveis físicas a serem manipuladas, no controle do processo de estabelecimento do problema, assim como também no estabelecimento de hipóteses para o modelo, proposição de teorias, postulados e teoremas, guias para a busca de solução do problema, controle, aferimento e aproximação da solução. Geralmente problemas complexos demandam forte esforço de cálculo, a partir do estabelecimento de modelos matemáticos e numéricos robustos ou do estabelecimento de linhas de relações entre variáveis em diversas escalas de observação (Tanenbaum, 2001).

A modelagem científica computacional aplica a computação a outras áreas do conhecimento. Ela permite que se criem modelos computacionais para situações em que é impossível ou muito custoso financeiramente testar ou medir as diversas soluções possíveis para um fenômeno a partir de modelos experimentais ou por solução analítica. Esta ferramenta viabiliza a adoção da abordagem computacional, avançando além das limitações, completando e integrando outras abordagens, de forma que muitas vezes acaba sendo a única opção para o tratamento de um problema da natureza.

A importância da utilização da modelagem computacional neste tipo de estudo se dá pela inviabilidade de poder realizar o estudo de forma física, pois o trabalho é realizado em uma área

real, com dados reais. A utilização de tanques de água, com conversores em escalas menores apenas para análise não possibilita ter resultados reais e sim apenas uma exemplificação, como ocorre em vários estudos apresentados na literatura. A modelagem computacional possibilita utilizar dados reais, coletados e calculados de diversos anos e assim aplicados e um local real com dimensões reais e desta forma observar e analisar os resultados de uma forma que de nenhuma outra maneira seria possível realizar tendo assim resultados mais precisos nestes tipos de estudo.

## 1.5. Design Construtal

A origem da Teoria Construtal ocorreu a partir da observação do design das estruturas naturais, entendendo que este é um fenômeno físico que acontece em sistemas de fluxo de dimensões finitas, de pequeno e grande porte como os raios, os rios, flocos de neve, tecidos vivos vascularizados, ou mesmo o tráfego das cidades, entre outros. O princípio físico empregado nessa Teoria é denominado lei Construtal do Design e da Evolução e afirma que: “para que um sistema de dimensões finitas onde existe escoamento possa persistir no tempo, a sua configuração deve evoluir livremente de tal modo que proporcione maior acesso para as correntes que fluem através dele” (Bejan, 1996).

A biofísica, geofísica e sistemas naturais são alguns exemplos de onde o princípio desta teoria pode ser empregada. A teoria tem como objetivo minimizar a resistência global para suas correntes internas (Bejan, 2000; Bejan et al., 2009). Observando a maneira em que os escoamentos ocorrem na natureza, pode ser verificada uma grande semelhança entre as estruturas. Essa semelhança se dá, pois, os sistemas abertos tendem a maximizar os acessos dos fluxos que escoam por ele ou de diminuir as resistências que podem surgir no escoamento. Dessa forma, o design dos sistemas naturais ocorre de forma determinística e não aleatoriamente.

A Teoria Construtal é fundamentada em um princípio de configuração, geração e evolução no tempo na direção do maior acesso de fluxo global em sistemas que podem variar livremente a sua geometria (Bejan, 2000; Bejan e Lorente, 2008). Segundo Bejan e Lorente (2004), o método Design Constructal é o método baseado na Lei Construtal, que é empregado na obtenção das configurações que melhoram o desempenho dos sistemas de escoamento através de uma distribuição ótima das imperfeições ou irreversibilidades.

A partir do trabalho de Bejan e Lorente (2008), pode ser observado que a Teoria Construtal trata da geração de arquiteturas em sistemas termodinâmicos que estão em desequilíbrio. A natureza oferece exemplos de que a configuração ideal para os sistemas de fluxo distribui as irreversibilidades naturais como, o atrito e a transferência de calor entre dois meios com diferenças finitas de temperaturas. Mudanças no design dos leitos de rios de forma a movimentar a água mais facilmente, a bifurcação das veias no corpo dos animais a fim de otimizar o fluxo sanguíneo nos tecidos, entre tantos outros, são exemplos de configurações que poderiam ser citadas (Bejan e Zane, 2012).

Este movimento não age de forma isolada e sim interagindo com o meio, que vai evoluindo e procurando se equilibrar com seu entorno, a fim de evitar as resistências do escoamento. Sendo assim, a Lei Constructal mostra de forma inovadora como observar a evolução e o aperfeiçoamento das formas e estruturas complexas ao se desenvolverem ao nosso redor.

## **1.6. Objetivos**

O principal objetivo deste trabalho é avaliar as geometrias que aumentam a potência disponível de uma matriz de turbinas dentro de um sítio de conversão de energia localizado na Plataforma Continental Sul do Brasil através da aplicação do Design Construtal.

### **1.6.1. Objetivos Específicos**

- Realizar a análise da hidrodinâmica do local com base em uma simulação hidrodinâmica anual;
- Verificar o padrão dominante das correntes costeiras para a região escolhida;
- Avaliar através do Design Construtal o efeito do número de turbinas sobre a potência disponível do arranjo;

- Definir a configuração geométrica do arranjo empregando uma função de construção para o arranjo de turbinas;
- Estimar as taxas de conversão de energia do sítio escolhido como o de melhor configuração e comparar com arranjos encontrados na literatura.

## 2. Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho será utilizada a modelagem tridimensional e a análise direta dos resultados obtidos. O sistema de modelagem numérica utilizado será o TELEMAC<sup>1</sup>, através do módulo hidrodinâmico TELEMAC3D. Este módulo é utilizado para estudos de aspectos relacionados à hidrodinâmica tridimensional de escoamento com superfícies livres de rios, estuários, regiões costeiras e/ou oceânicas. O módulo de conversão de energia foi desenvolvido por (Marques et al., 2012) e será utilizado para a análise da conversão da energia das correntes em energia elétrica.

O TELEMAC3D resolve as equações de Navier-Stokes através do método dos elementos finitos para a discretização espacial e a utilização de coordenadas sigma para a discretização vertical, de forma a acompanhar os limites superficiais e de fundo (Hervouet, 2007); (Hervouet e Van Haren, 1996). Para o estudo de um sistema composto por diferentes compartimentos, como a porção lagunar, o estuário e a região costeira adjacente, o método de elementos finitos é o mais adequado, pois permite: a discretização detalhada da linha de costa, uma melhor representação dos acentuados gradientes batimétricos, a otimização do tempo computacional e a aplicação de refino diferenciado dentro da grade numérica.

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.

O principal resultado obtido na malha é a elevação da superfície livre, enquanto os resultados obtidos em cada ponto da malha são a velocidade nas três direções e a concentração de quantidades transportadas em cada ponto do domínio computacional. Este modelo pode considerar efeitos como:

- Influência da temperatura e salinidade;
- Fricção de fundo;
- Influência da força de Coriolis;

---

<sup>1</sup> [www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)

- 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-ômega);
- Zonas secas dentro do domínio;
- Transporte de traçadores e difusão pelas correntes com a criação ou desaparecimento de termos.

## 2.1. Equacionamento do modelo

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

A aproximação hidrostática considera a simplificação dos termos da velocidade na 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 da pressão hidrostática e da gravidade são mantidos na equação vertical de quantidade de movimento. Desta forma, 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 massa específica ( $\Delta\rho$ ) em relação a um valor de referência ( $\rho_0$ ) é supostamente pequena. Desta forma, como a equação do estado da água do mar relaciona a massa específica do fluido com a concentração dos traçadores na massa de água, é possível definir a sua influência nas equações hidrodinâmicas.

Neste sentido, é possível utilizar 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.

Considerando que a massa específica do fluido é denotada por  $\rho$ , a pressão por  $p$  e o vetor velocidade por  $(u, v, w)$ , a equação da continuidade e as equações da conservação da quantidade de movimento em coordenadas cartesianas podem ser escritas como:

Equação da continuidade, Hervouet (2007):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

As equações da conservação da quantidade de movimento em  $x$  e  $y$ , Hervouet (2007):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial x} + v \Delta(U) + F_x \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + v \Delta(V) + F_y \quad (2.3)$$

Equação da pressão hidrostática, Hervout (2007):

$$p = p_{atm} + \rho_o g (S - z) + \rho_o g \int_z^s \frac{\Delta \rho}{\rho_o} dz' \quad (2.4)$$

Onde: o termo  $F_x$  é o termo fonte da quantidade de movimento da equação  $u$  e  $F_y$  é termo fonte da quantidade de movimento da equação  $v$ ,  $p$  é o resultado calculado para pressão hidrostática,  $p_{atm}$  é a pressão atmosférica,  $Z$  e  $z$  representam a elevação da superfície,  $\Delta \rho$  é a variação de massa específica enquanto  $\rho_o$  representa a massa específica de referência.

### 2.1.1. Termos fonte das equações da quantidade de movimento

#### Fricção com o fundo

No fundo, a tensão de cisalhamento atuando no fluido se opõe à velocidade de corrente e pode ser descrita como, Hervouet (2007):

$$\vec{\tau} = -\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} \quad (2.5)$$

Onde,  $\vec{\tau}$  representa a tensão de cisalhamento e o conhecimento desta tensão é possível a partir do conhecimento do comportamento do escoamento. Modelos de turbulência podem fornecer esta estimativa, baseado no conhecimento da velocidade de corrente próximo ao fundo. Através de uma análise dimensional, a seguinte equação para representar a tensão de cisalhamento do fundo é obtida, Hervouet (2007):

$$\vec{\tau} = -\frac{1}{2}\rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} \vec{u} \quad (2.6)$$

Considerando, as unidades dadas em  $kgm^{-1}s^{-2}$ , em que  $C_f$  é um coeficiente de fricção adimensional. Por definição, esta equação serve para a determinação da tensão de cisalhamento sendo baseada na hipótese de que está longe o suficiente da barreira sólida. Desta forma, juntando as equações anteriores (3.5 e 3.6), pode ser obtido, Hervouet (2007):

$$\nu \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} = -\frac{1}{2}\rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} \vec{u} \quad (2.7)$$

A tensão  $\nu \frac{\partial \vec{u}}{\partial n}$  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 o cisalhamento de velocidade 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 do coeficiente de Chézy (equação 3.8), que é utilizada neste trabalho, Hervouet (2007).

$$C_f = \frac{2gm^2}{h^{1/3}} \quad (2.8)$$

Onde:  $m$  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 3.9, Hervouet (2007):

$$\nu \frac{\partial \vec{u}_H}{n} = \frac{\rho_{ar}}{\rho} a_{vento} \vec{W} \cdot |\vec{W}| \quad (2.9)$$

Assim pode ser descrita a massa específica do ar com  $\rho_{ar} = 1,29 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $\vec{u}_H$  como a velocidade na superfície do domínio,  $\vec{W}$  sendo a intensidade do vento e  $|\vec{W}|$  o módulo desta intensidade. O coeficiente de influência do vento  $a_{vento}$  (adimensional) é dado por Flather (1976) como:

$$\begin{aligned} a_{vento} &= 0.656 \times 10^{-3} \rightarrow |\vec{W}| \leq 5 \text{ m/s} \\ a_{vento} &= (-0.12 + 0.137|\vec{W}|) \times 10^{-3} \rightarrow 5 \text{ m/s} \leq |\vec{W}| \leq 19.22 \text{ m/s} \\ a_{vento} &= 2.513 \times 10^{-3} \rightarrow |\vec{W}| \geq 19.22 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (2.10)$$

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 na qual a observação é feita a partir da superfície.

### Força de Coriolis

Esta força é levada em consideração pelo fato da 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 as equações do movimento em referenciais inerciais. A força de Coriolis em uma certa latitude ( $\phi$ ) é dada por, Hervouet (2007):

$$F_x = 2\omega v \sin\phi = fv \quad (2.11)$$

$$F_y = -2\omega u \sin\phi = -fu \quad (2.12)$$

### Trocas de calor

A potência térmica liberada para a atmosfera por unidade de área  $P$  é considerada proporcional a  $T - T_{ar}$ , sendo  $T$  a temperatura da água na superfície e  $T_{ar}$  a temperatura do ar. Desta forma, pode ser definido através de conceitos termodinâmicos que, Hervouet (2007):

$$P = A(T - T_{ar}) \quad (2.13)$$

Em que,  $A$  é o coeficiente de troca de calor em  $Wm^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ . Portanto, o fluxo de calor ( $\phi$ ) pode ser escrito por, Hervouet (2007):

$$\phi = -\rho C_p \partial_T \vec{\nabla} \cdot \vec{n} = -\rho C_p \partial_T \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.14)$$

Considerando o coeficiente de difusão de calor na água  $C_p = 4.18 K g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ . Pelo agrupamento das duas equações podem ser obtidas as equações das condições de contorno, Hervouet (2007):

$$\nu_T \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{A}{\rho C_p} (T - T_{ar}) \quad (2.15)$$

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) expressou o coeficiente  $A$  de acordo com a temperatura da água  $T$  e a velocidade do vento  $W$  medida no ponto como, Hervouet (2007):

$$A = (4.48 + 0.0049T) + 2021.5b(1+W)(1.12 + 0.018T + 0.0015T^2) \quad (2.16)$$

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

### Termos de fluabilidade e pressão atmosférica

Os termos do gradiente de pressão atmosférica e os termos de fluabilidade que aparecem nos termos do gradiente de pressão são integrados com os termos fonte, de forma que, são relativos aos eixos  $O_x$  e  $O_y$ :

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \approx -\frac{1}{\rho_o} \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - g \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial Z_s}{\partial x} - g \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_o} dz' \right) \quad (2.17)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \approx -\frac{1}{\rho_o} \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - g \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial Z_s}{\partial y} - g \frac{\partial}{\partial y} \left( \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_o} dz' \right) \quad (2.18)$$

A salinidade é expressa em  $kg.m^{-3}$  e a temperatura  $T$  em  $^{\circ}C$ . A utilização destes traçadores possibilita o cálculo de variações na massa específica para os termos de fluabilidade, Hervouet (2007).

O modelo TELEMAC3D considera algumas possibilidades de cálculo da massa específica no modelo incorporando os efeitos dos traçadores em conjunto ou separadamente através de equações simplificadas. A massa específica da água pode então ser calculada como função da temperatura e da salinidade.

### Modelo de turbulência $k-\varepsilon$

Este é um modelo de turbulência bastante utilizado e para simulações de propósitos gerais, o modelo  $k-\varepsilon$  oferece um bom compromisso em termos de precisão e robustez. O modelo  $k-\varepsilon$  é baseado em equações de transporte para a energia cinética de turbulência (representada por  $k$ ) e pela sua taxa de dissipação (chamada de  $\varepsilon$ ) Soares e Neto (2014). Sendo o modelo padrão  $k-\varepsilon$  composto por estas duas equações, Launder e Spalding (1972):

Equação para energia cinética turbulenta ( $k$ )

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (2.19)$$

Para dissipação ( $\varepsilon$ )

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.20)$$

Onde  $\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}$  e  $\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}$  são as taxas de variação de ( $k$  ou  $\varepsilon$ ) e  $\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}$ ,  $\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i}$  representam o transporte de ( $k$  ou  $\varepsilon$ ) por convecção, isso é igual ao transporte de ( $k$  ou  $\varepsilon$ ) por difusão representado pelos termos  $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$ ,  $\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$ , mais a taxa de produção de ( $k$  ou  $\varepsilon$ )  $2\mu_t E_{ij} E_{ij}$ ,  $C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij}$  menos a taxa de destruição de ( $k$  ou  $\varepsilon$ ) que são os termos finais da equação  $\rho \varepsilon$ ,  $C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$ .

Ainda existem outros termos na equação e suas representações:  $u_i$  representa a velocidade do componente na direção correspondente,  $E_{ij}$  corresponde aos componentes da taxa de deformação,  $\mu_t$  representa a viscosidade turbulenta e ainda existem as constantes ajustáveis  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_{1\varepsilon}$  e  $C_{2\varepsilon}$ .

O modelo k- $\varepsilon$  é um dos mais utilizados na modelagem de escoamentos práticos de engenharia. Sua popularidade fora do âmbito acadêmico pode ser explicada por qualidades como robustez, economia e precisão aceitável para o nível industrial de escoamentos e transferência de calor. Deve ser ressaltado que na derivação dos modelos k- $\varepsilon$ , é imposta a condição que o escoamento é totalmente turbulento e os efeitos da viscosidade molecular são desprezados. Consequentemente, o modelo k- $\varepsilon$  é válido somente para escoamentos completamente turbulentos, além de ter sido desenvolvido para aplicações em altos números de Reynolds (Soares e Neto, 2014).

Para maiores informações sobre o equacionamento do modelo TELEMAC3D e aplicações para a região de estudo, consultar Marques et al. (2009) e Hervouet e Van Haren (1996), Hervouet (2007).

## 2.2. 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. A figura 2.1 mostra a área do domínio que se estende entre as latitudes de 29.9°S e 33.2°S e as longitudes de 52.7°W e 49.6°W.

### **2.3. Geração da grade de elementos finitos**

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.

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.

#### **2.3.1. Estrutura da Malha Batimétrica**

As diferentes combinações de conjuntos batimétricos ajudaram na realização da criação da grade batimétrica para a realização deste trabalho.

Foram utilizadas cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para a extração dos dados batimétricos da região estuarina:

- N°2101: Costa Sul – Porto do Rio Grande
- N°2102: Lagoa dos Patos – São José do Norte ao Canal da Setia
- 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 N°2140.
- Para a zona costeira, a batimetria foi representada através das seguintes cartas náuticas da DHN.

- 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
- N°D2210: 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).

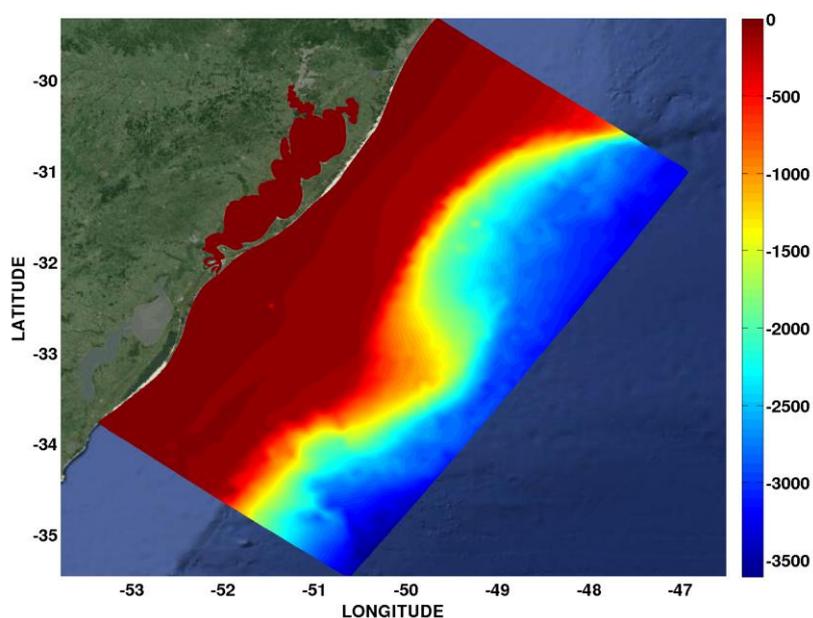


Figura 2.1 - Domínio computacional utilizado neste estudo.

### 2.3.2. Malha Computacional

As integralizações dos dados batimétricos foram realizadas através do software Blue Kenue onde foi gerada a grade numérica de elementos finitos. Este software foi desenvolvido pelo CHC (*Canadian Hydraulic Centre*), sendo recentemente agregado à lista de programas recomendados para usuários do sistema openTELEMAC-MASCARET. Uma das suas funções é de criar malhas de elementos finitos, além da pós visualização de resultados do modelo numérico.

A malha desenvolvida para este trabalho possui cerca de 67665 nós. A figura 2.2 mostra a malha desenvolvida para o estudo da hidrodinâmica do local. A figura 2.3 mostra a malha das turbinas onde está localizada a área do sítio de conversores (retângulo vermelho). As arestas dos

triângulos da malha na região do sítio de conversores possuem uma distância média de 20 m. Esta foi a melhor resolução conseguida sem comprometer a qualidade do refinamento da malha.

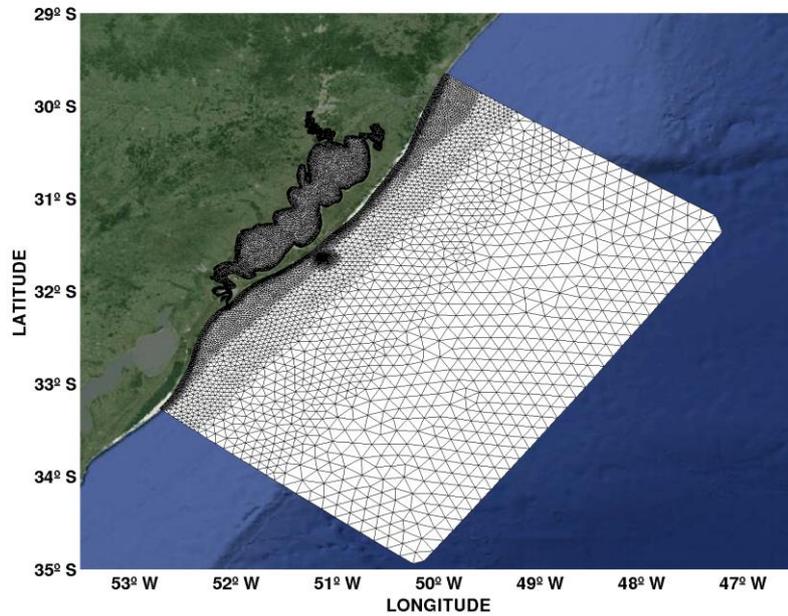


Figura 2.2 - Malha para análise da hidrodinâmica do local de estudo.

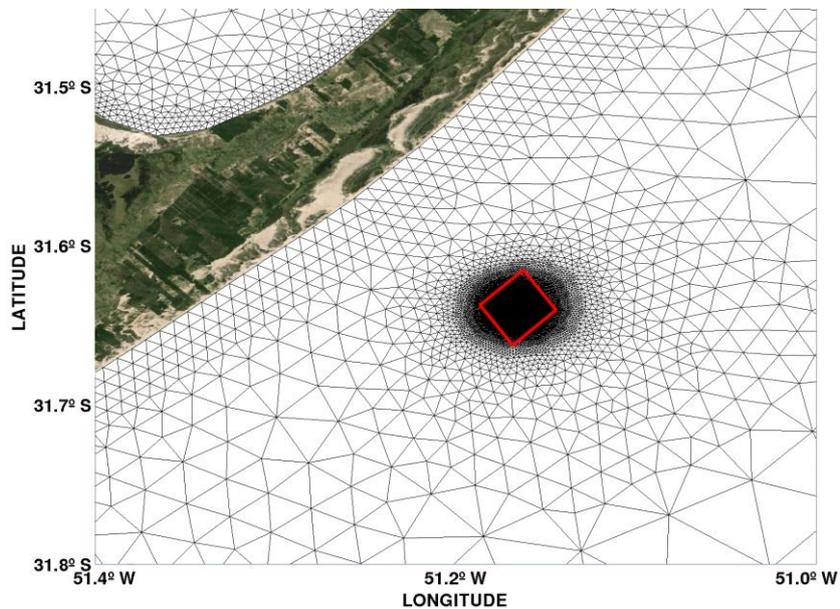


Figura 2.3 - Área da malha com o maior refinamento alcançado no sítio de conversores. As arestas dos triângulos possuem um distanciamento de 20 m.

## 2.4. 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 elementos finitos triangulares com interpolação linear, de forma que é possível construir uma malha tridimensional duplicando os triângulos no domínio  $\Omega$  quantas vezes se fizer necessário (figura 2.4).

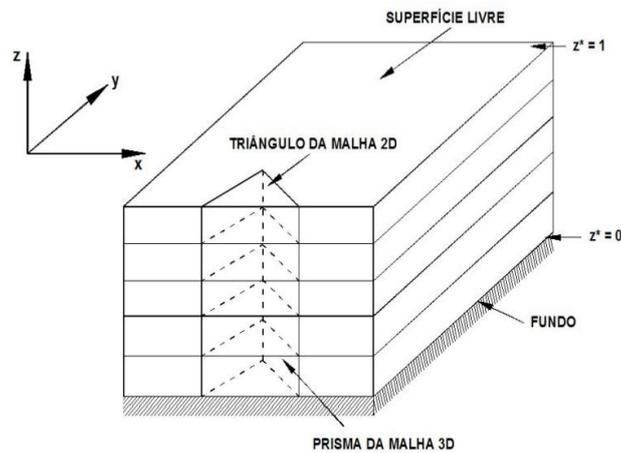


Figura 2.4 - Malha tridimensional obtida pela superposição da malha bidimensional de elementos triangulares (modificado de Hervouet e Van Haren (1996))

### 2.4.1. Transformação Sigma

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

$$z^* = \frac{z - z_f}{z_s - z_f} \quad (2.21)$$

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  $(x, y, \sigma)$ . Este sistema de coordenadas permite acompanhar os limites superficiais e de fundo.

Neste trabalho são utilizados 15 níveis sigma para a geração de condições iniciais e de contorno, sendo que estes níveis foram distribuídos de forma a fornecer uma melhor resolução das camadas superficiais e de fundo. A figura 2.5 mostra uma visão esquemática da distribuição de 5 níveis sigma ao longo de uma seção transversal de uma malha de altura variante de 0,4 m a -0,2 m.

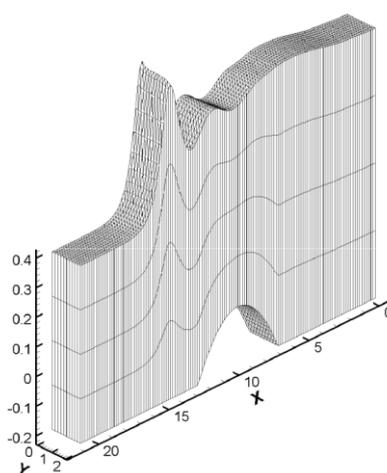


Figura 2.5 - Representação tridimensional dos níveis sigma da malha numérica

## 2.5. Condições Iniciais de Contorno

O modelo TELEMAC3D leva em consideração dois tipos de condições de contorno e além das condições iniciais pré-definidas o modelo numérico necessita de condições de contorno para a realização do cálculo das variáveis. A primeira condição de contorno que o modelo considera são os contornos líquidos, onde podem ser prescritas oscilações, fontes de quantidade de movimento ou de descargas fluviais (como por exemplo, a desembocadura de rios ou as fronteiras oceânicas) (Kirinus e Marques, 2013).

Existem dois tipos de contornos líquidos descritos neste trabalho e levados em consideração nas condições de contorno, um deles são as fronteiras oceânicas, onde são prescritas as marés, as velocidades de corrente, a salinidade, a temperatura e os níveis de água. A outra condição de

contorno líquido considerada são as fronteiras continentais onde ocorrem as descargas fluviais prescritas através de séries temporais dos rios Guaíba, Camaquã e do Canal São Gonçalo.

Uma outra condição de contorno considerada pelo modelo são os contornos superficiais, onde são prescritos os ventos ou campos escalares e as ondas de superfície. Neste trabalho foram utilizados dados de ventos dinâmicos e temperatura do ar de forma a simular as trocas de calor com a atmosfera.

Foram extraídos dados de condições iniciais e de contorno de diferentes fontes para serem utilizados no domínio do modelo e estes dados foram interpolados e prescritos para cada ponto da malha de elementos finitos.

Através do projeto *Ocean Circulation and Climate Advanced Modeling Project*<sup>2</sup> (OCCAM), foram obtidos os dados para as condições iniciais de salinidade e temperatura e estes dados foram ordenados de forma tridimensional em todo o modelo. Para as descargas nas fronteiras continentais foram prescritas séries temporais do rio Guaíba e do rio Camaquã extraídas da página da Agência Nacional de Águas<sup>3</sup> (ANA), estas séries foram interpoladas no modelo linearmente para cada passo de tempo. Além de que para a elevação do nível do mar foi prescrito 0,5 m, valor este aproximado da elevação do mar médio na região (Möller et al., 2008) e um campo de velocidades iniciais nulas. Devida a falta de séries temporais de descarga do Canal São Gonçalo, foi considerado constante o valor de 760 m<sup>3</sup> (Viegas e Franz, 2006), durante toda as simulações.

Para a definição das condições de contorno superficiais foram obtidos dados do National Oceanic & Atmospheric Administration<sup>4</sup> (NOAA) para que as variações espaço-temporais fossem representadas, interpoladas e aplicadas a cada nó da malha no domínio do modelo numérico. Para complementar, os dados de temperatura do ar junto à superfície do oceano foram obtidos dados também 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 (Kirinus e Marques, 2013).

A figura 2.6 mostra as condições de contorno iniciais da malha de estudo, tanto a malha de hidrodinâmica quanto a malha das turbinas tiveram as mesmas condições de contorno.

Para que as simulações fossem realizadas no tempo estipulado, foi obtido um ano climatológico através das condições iniciais e de contorno gerados para a malha. Todas as simulações foram realizadas com um tempo de 365 dias, sendo que os dados foram calculados diariamente.

---

<sup>2</sup> <http://www.noc.soton.ac.uk/JRD/OCCAM/EMODS/>

<sup>3</sup> [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)

<sup>4</sup> <http://www.cdc.noaa.gov/data/reanalysis/reanalysis.shtml>

Este ano climatológico compreende 1 ano de médias climatológicas calculadas entre os anos de 2003 a 2014. Os dados calculados para que este ano de médias climatológicas utilizam os dados globais atmosféricos do NOAA e os dados oceânicos do HYCOM.

Para cada dia deste ano, foram calculados os dados médios de cada dia entre os anos de 2003 a 2014. A figura 2.7 apresenta como foi obtido o ano com as médias climatológicas compreendidas entre 2003 e 2014.

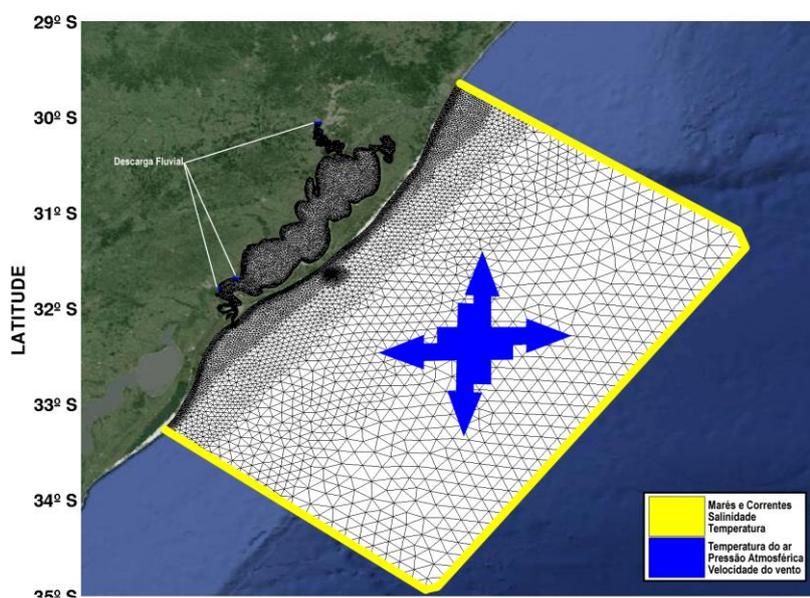


Figura 2.6 - Condições de contorno da malha

As simulações foram realizadas em uma máquina que tem a seguinte configuração: Processador Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU @ 3.40 GHz com 8 núcleos, 16 Gb (gigabyte) de memória RAM e Hard Disk de 1 Tb (terabyte). Cada simulação levava em torno de 2 a 3 meses para serem concluídas, sendo que uma simulação só poderia ser feita após ter os resultados da outra, pois havia uma dependência de resultados para que os passos fossem seguidos, isto se não ocorresse falta de energia elétrica ou algum travamento da máquina, o que levava ao cancelamento da simulação e várias vezes foi necessário reiniciar os procedimentos novamente. Este motivo fez com que a busca exaustiva pelas posições dos conversores não fosse possível, sendo assim utilizada a metodologia proposta.

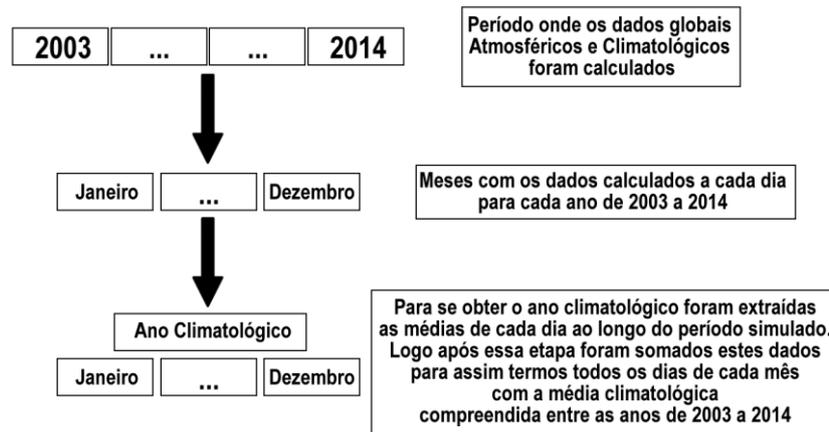


Figura 2.7 - Esquema para representar a obtenção do ano climatológico.

## 2.6. Cálculo da potência convertida

Para que as verificações associadas à conversão de energia das correntes em energia elétrica foram utilizadas o módulo de conversão de energia 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).

$$P = \frac{1}{2} \eta \rho A v^3 \quad (2.22)$$

Onde: ( $P$ ) é a potência convertida, ( $\eta$ ) é o coeficiente de eficiência da turbina, ( $\rho$ ) é a massa específica da água, ( $A$ ) é a relação entre  $H/R$ , onde ( $H$ ) é a altura e ( $R$ ) o Raio da turbina e ( $v$ ) é a velocidade nominal.

Com a adaptação da equação das turbinas para ser aplicada em ambientes marinhos e levando em consideração o princípio da conservação de energia, os conversores foram acoplados ao módulo hidrodinâmico TELEMAC3D. Durante cada passo de tempo do modelo hidrodinâmico TELEMAC3D a velocidade das correntes é calculada e transferida para o módulo de conversão de energia (figura 2.8), que converte parte da energia das correntes em energia elétrica através da equação padrão de turbinas (equação: 3.22), (Kirinus e Marques, 2013).

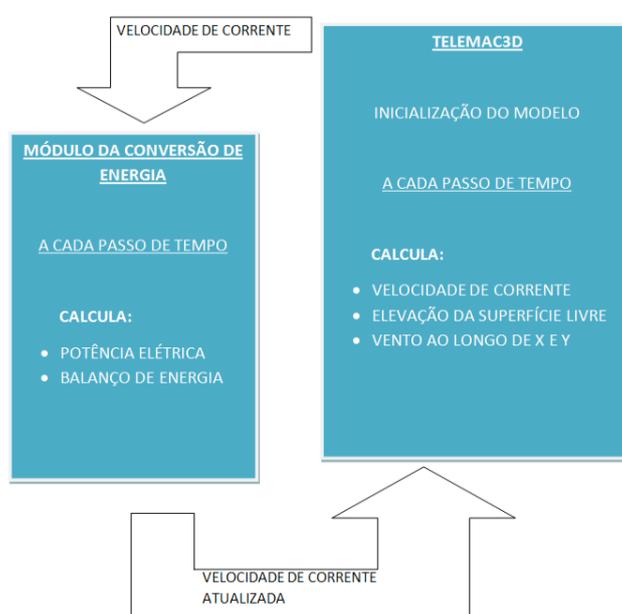


Figura 2.8 - Módulo de conversão de energia desenvolvido por Marques et al. (2012)

Alguns parâmetros técnicos dos conversores foram seguidos para que os resultados pudessem ser comparados com os resultados obtidos por estudos realizados nesta mesma região. A (Tabela 5) mostra quais foram os parâmetros utilizados por Kirinus e Marques (2013) e este estudo seguiu estes parâmetros técnicos para obter seus resultados também.

Tabela 5 - Parâmetros Técnicos da Turbina

Velocidade Inicial de conversão	0 m/s
Velocidade máxima para conversão	1,5 m/s
Coefficiente de Eficiência	0,35
Potencia nominal	170 kW
Altura da Turbina	14 m
Raio da Turbina	10 m

Da mesma forma que o módulo de conversão de energia de Marques et al. (2012) foi atualizado para o estudo do sítio de conversão (Figura 2.9) no trabalho de Kirinus e Marques (2013), este estudo utiliza do mesmo método, 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 à 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 sólidos, ou seja, o fluxo incidente não atravessa o conversor, apenas é reduzido e re-calculado (Kirinus e Marques, 2013).

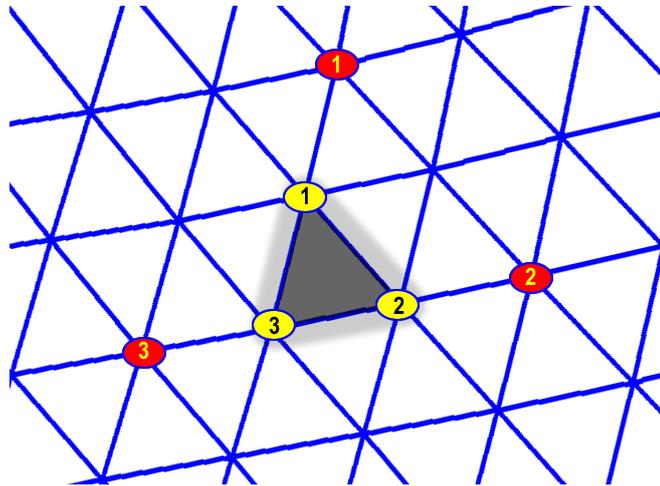


Figura 2.9 - Demonstração da relação entre a velocidade incidente (vermelho) e o conversor (amarelo) no módulo de conversão de energia.

### 2.6.1. Cálculo dos valores de conversão

Para que os resultados deste trabalho possam ser analisados, serão calculados valores médios, máximos, desvio padrão e integrado, na forma demonstrada a seguir exemplificada para a velocidade ( $v$ ).

Os valores médios serão calculados através do somatório de todos os valores de velocidade em cada ponto, durante todos os passos de tempo da simulação e divididos pela variação total de tempo ( $\Delta t$ ), isto quer dizer que será uma média pontual a toda simulação. O mesmo será realizado para o desvio padrão, gerando assim valores de desvio de cada ponto durante a simulação.

Para que sejam calculados os valores máximos, serão encontrados os valores máximos de velocidade ( $v$ ) em cada um dos pontos, durante todo o período simulado. Enquanto o cálculo dos valores integrados, serão calculados através do somatório de toda a potência ( $P$ ) gerada em cada ponto durante o processo de simulação.

As expressões para o cálculo da média, desvio padrão, valores máximos e integrados são dados, respectivamente, por:

$$Média = \sum_{t_i \rightarrow t_f} \frac{\nu(t)}{\Delta t} \quad (2.25)$$

$$DesvioPadrão = STD_{t_i \rightarrow t_f} \frac{\nu(t)}{\Delta t} \quad (2.26)$$

$$Máximo = MAX_{t_i \rightarrow t_f} \frac{\nu(t)}{\Delta t} \quad (2.27)$$

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

## 2.7. Aplicação do Design Construtal

O Design Construtal é um método empregado para a avaliação de formas geométricas em sistemas submetidos a alguma espécie de movimento (fluxo). Para isto, neste método, o escoamento deve ter liberdade para evoluir e a geometria é obtida a partir de um princípio de maximização do desempenho de todas as variáveis analisadas. Além disso, a geometria deve ser submetida a restrições globais e variada de acordo com seus graus de liberdade (Bejan, 2000).

Para aplicar o Design Construtal na avaliação geométrica de um sistema físico é necessário, basicamente, determinar um indicador de desempenho final (uma grandeza a ser maximizada ou minimizada: vazão mássica, potência, energia e etc.), graus de liberdade (parâmetros geométricos que sofrerão variações durante o processo de otimização) e restrições geométricas (parâmetros que são mantidos constantes ao longo do processo de avaliação geométrica) (Bejan, 2000).

O Design Construtal agregou ao estudo de otimização em problemas de engenharia o conhecimento de que a estrutura do escoamento não é assumida em antecipação, mas sim uma consequência. O objetivo da otimização depende das características do problema. Em geral, a Lei Construtal define regras para a estrutura otimizada em cada escala, desde o sistema elementar (a menor escala) até as maiores construções (escalas de mais alta ordem). As regras são deduzidas, não assumidas. Resultados mostram que essas regras mudam de um nível de escala para outro, conforme o tamanho da complexidade aumenta (Reis, 2006).

Tendo em vista todas as aplicações em que o Design Construtal se desenvolve e o quão importante é a avaliação geométrica de um sistema físico o presente trabalho que tem por objetivo maximizar a potência disponível no arranjo de turbinas do sítio estudado foram estabelecidas algumas restrições para que o Design Construtal fosse aplicado.

- Primeiro foi estabelecido que a área de ocupação da turbina, determinado  $1D$  (um diâmetro), equivale a um triângulo da malha, que tem como medida  $20\text{ m}$  entre cada aresta;
- A área de ocupação do sítio foi definida como uma circunferência com raio de  $2000\text{ m}$ , sendo que o primeiro conversor será implantado ao centro desta circunferência. A área de ocupação do sítio foi definida com este comprimento para que não houvesse restrições laterais ao arranjo de conversores, pois assim o sistema conseguirá escoar livremente dentro desta área e sendo assim a análise do posicionamento dos conversores foram definidos a partir do comportamento do escoamento após ultrapassar o conversor;
- Outra restrição para o estudo é a distância entre conversores, o qual foi estabelecido como distância mínima de  $3D$  (três diâmetros), entre os conversores. Respeitando essa restrição, a inserção de novos conversores é realizada no ponto de maior velocidade da corrente a jusante do primeiro conversor. Essa metodologia foi adotada, pois a realização do estudo utilizando a busca exaustiva do melhor posicionamento seria inviável, pois o esforço computacional para a realização da simulação de cada cenário é enorme.

### **2.7.1. Implantação dos conversores**

Para que as turbinas fossem implantadas dentro do sítio, alguns passos foram seguidos levando em consideração o método do Design Construtal.

Foram definidos 4 passos que foram executados para a construção do arranjo de turbinas colocados no sítio neste trabalho. Cada passo foi analisado a partir de simulações realizadas com períodos de 1 ano (365 dias). Ao final de cada simulação foram observados quais os locais com maior média de intensidade de corrente a jusante de cada turbina, e com este local definido, foi implantado o próximo conversor. Segue abaixo a sequência de passos que foram realizados:

- Passo 1 - Com a direção da maior média de corrente definida foi implantado o primeiro conversor e observado o comportamento da corrente para ser definido o local dos próximos conversores. Após a inserção do primeiro conversor (vide fig. 2.10) uma nova simulação

com período de 1 ano deve ser realizada para obtenção dos campos de velocidade e corrente para então se definir o local dos próximos conversores.

- Passo 2 - Após a simulação realizada com um conversor no sítio são definidos os pontos de maior média de intensidade da corrente a jusante do primeiro conversor. Os dois pontos de maior magnitude são definidos como os locais para a implementação de dois novos conversores (2 e 3, vide fig. 2.10);
- Passo 3 - Após a realização de uma simulação e analisado o comportamento da corrente, foram encontrados mais dois locais para a implantação de outros dois conversores (4 e 5, vide fig. 2.10);
- Passo 4 - Neste passo foram encontrados os locais mais apropriados para implantar mais 2 conversores levando sempre em consideração a maior média de intensidade da corrente, conversores (6 e 7, vide fig. 2.10).

Seguindo estes passos a partir de cada simulação realizada, foi possível observar que sempre havia dois locais com maior intensidade de corrente, sendo assim possível implantar dois conversores de cada vez, sem a necessidade de realizar uma simulação para cada conversor.

Outra observação que deve ser levada em consideração é que implantando dois conversores de cada vez, estava se configurando de maneira à ocupar a área do sítio de forma organizada e sem haver perda de intensidade entre os conversores. Desta forma poderia alcançar uma maior conversão da corrente em energia elétrica. A figura 2.10 representa esquematicamente como foram realizados estes passos.

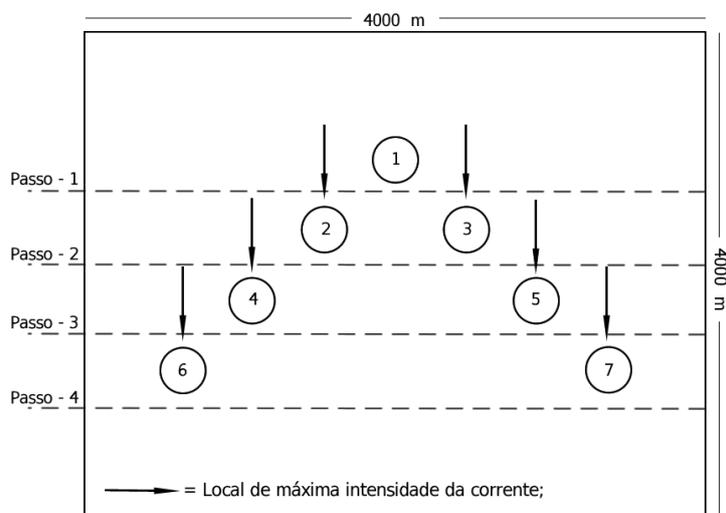


Figura 2.10 - Esquema com os passos seguidos para a implantação do sítio de turbinas.

### 3. Resultados

Como o foco deste estudo é analisar a hidrodinâmica de uma região da PCSB de forma a poder definir onde os conversores de energia de correntes serão implantados, e de que forma estes conversores podem ser dispostos para maximizar a conversão de energia, os resultados da primeira simulação realizada neste estudo foram comparados com o estudo realizado por Kirinus e Marques (2015).

Neste estudo, os autores identificaram que a região ao norte, próximo ao Farol da Conceição, é mais propícia para a conversão de energia, visto que apresenta menores desvios com relação aos valores médios, além de possuir uma batimetria mais regular. A análise do comportamento médio das correntes mostrou uma dominância de correntes paralelas à linha de costa com orientação dominante de Nordeste (NE) para Sudoeste (SO) (Kirinus e Marques, 2015).

O resultado da simulação hidrodinâmica anual realizada neste estudo é apresentado na figura 3.1. Este resultado mostra a média da intensidade de corrente integrada verticalmente na coluna de água. Este resultado indica que na região da plataforma continental média (isóbata de 20 *m*) as maiores médias de intensidade são observadas. Este resultado também validou o modelo e mostrou que o mesmo poderia ser utilizado para a realização do trabalho visto que o resultado desta simulação corrobora com os resultados encontrados em estudos realizados anteriormente.

As intensidades de correntes variam de 0.05 *m.s*<sup>-1</sup> nas regiões próximas da costa, a 0.07 *m.s*<sup>-1</sup> na região da plataforma continental média. Com base neste resultado das maiores médias de intensidade de corrente, foi definida uma área de restrição, sendo a área com maior refinamento na malha e na figura é a circunferência em destaque, onde foi implantado o primeiro conversor de energia de correntes na área do sítio de conversão.

O local escolhido para a implantação da primeira turbina foi no centro da área de restrição, visto que, as próximas simulações devem mostrar o comportamento das correntes com a presença do primeiro conversor de energia sendo considerado.

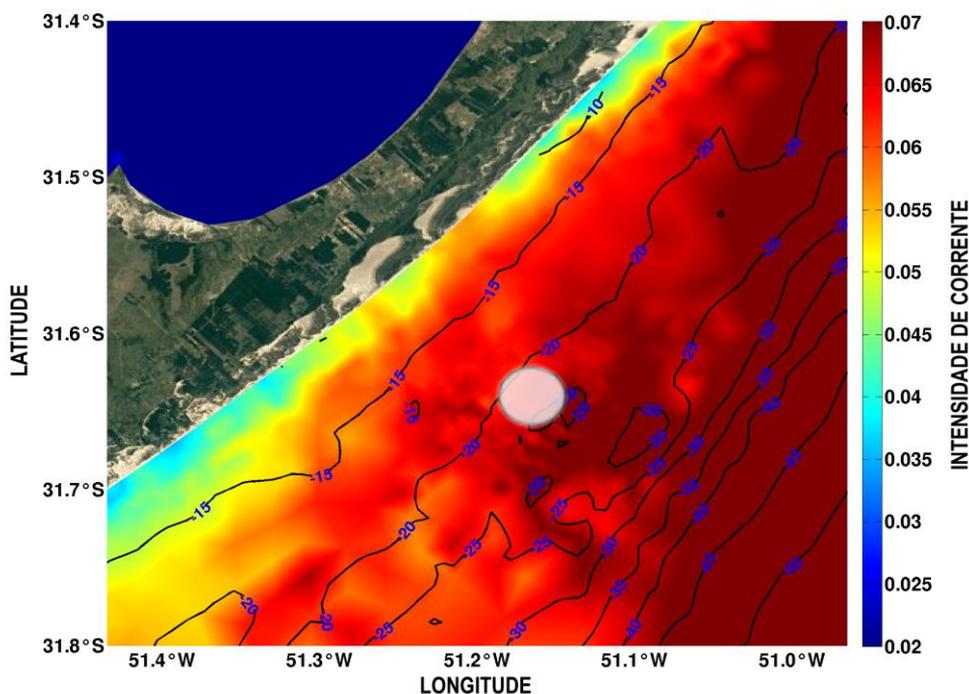


Figura 3.1 - Intensidade média da corrente na região localizada próximo ao Farol da Conceição durante o período de 365 dias de simulação. A escala de cores indica a intensidade das correntes em  $m.s^{-1}$ . Na imagem estão inseridas as isóbatas do local de estudo e a área de restrição está definida pela circunferência onde a profundidade do local fica em torno de 20 m.

### 3.1. Implantação do sítio de conversores de energia de corrente e análise da configuração

A figura 3.2 mostra o comportamento da corrente ao passar pelo primeiro conversor implantado. Esta simulação também tem duração de 365 dias e a escala de cores mostra a intensidade das correntes. As maiores intensidades (valores maiores que  $0.075 m.s^{-1}$ ) são observadas nas regiões adjacentes à leste e oeste do conversor.

Os vetores de velocidade média da corrente indicam que a componente residual do fluxo está direcionada de NE para SO, corroborando os estudos de Kirinus et al. (2012); Marques et al. (2012); Kirinus e Marques (2015); Kirinus et al. (2015) para esta região. Pode ser ressaltado neste resultado a formação de duas esteiras, as quais estão associadas ao padrão de correntes da região.

A esteira localizada a sudoeste da turbina tem uma maior extensão chegando a aproximadamente 700 m, quando comparada com a esteira localizada a nordeste da turbina. A

esteira de maior extensão se forma na região de “sombra“ da turbina com relação ao fluxo dominante e nesta região de esteira, as velocidades podem ser inferiores a  $0.05 \text{ m.s}^{-1}$ .

A análise do local com a maior média de intensidade de corrente a jusante do conversor foi realizada através de verificação pontual no domínio numérico, de forma que foi possível identificar com maior precisão os locais para a realização do próximo passo do trabalho, através da implantação de mais dois conversores. Os pontos onde foram encontradas as maiores médias de intensidade da corrente são marcados com um retângulo em amarelo na figura 3.2.

Na primeira simulação quando a corrente passa pelo conversor, ocorre uma redução na sua intensidade. Esta característica inviabiliza a implantação de um conversor na frente da turbina que já estava implantada, pois as taxas de conversão de energia nesta região seriam comprometidas pelas menores intensidades.

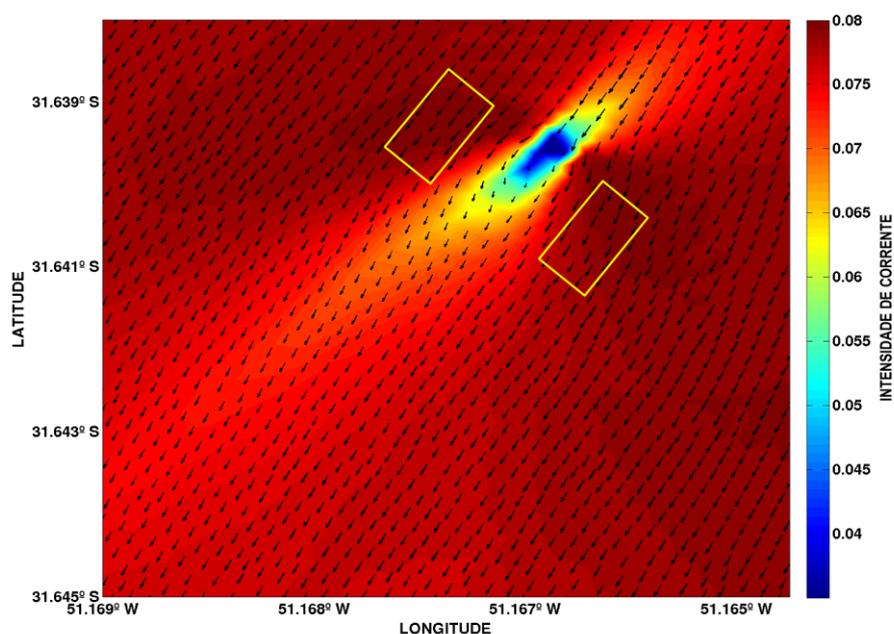


Figura 3.2 - Intensidade média da corrente na região localizada próximo ao Farol da Conceição durante o período de 365 dias de simulação. A região com uma primeira turbina utilizada é apresentada, e os vetores em preto representam a direção das correntes. A escala de cores indica a intensidade das correntes em  $\text{m.s}^{-1}$ .

De forma a aumentar a taxa de conversão de energia, devem ser utilizados os locais com maior intensidade de corrente. Já na primeira simulação foi possível verificar que a implantação de um conversor logo após o outro é inviável, principalmente pelo fato de atrás do conversor serem observadas as maiores alterações na magnitude da intensidade média da corrente.

Então, no segundo momento (passo 2), foi definido que seriam implantadas mais duas turbinas (turbinas 2 e 3) nos locais com maior intensidade de corrente a jusante do conversor 1. A figura 3.3 mostra o resultado desta simulação de 365 dias, onde é possível analisar o comportamento residual das correntes ao passar pelos conversores.

Após o término desta simulação foi possível observar que o comportamento residual permanece inalterado quando é utilizada uma configuração com 3 turbinas. Em comparação com o cenário de 1 turbina, existem mais dois locais com maior intensidade de corrente na área lateral externa dos conversores.

Este resultado sugere que mais 2 conversores podem ser implantados, visto que a área de restrição ainda não está totalmente preenchida (figura 3.3). Uma característica deste cenário é um aumento significativo na esteira que se forma a sudoeste das turbinas, que alcança 980 m, onde as médias de intensidade de corrente são menores que  $0.05 \text{ m.s}^{-1}$ .

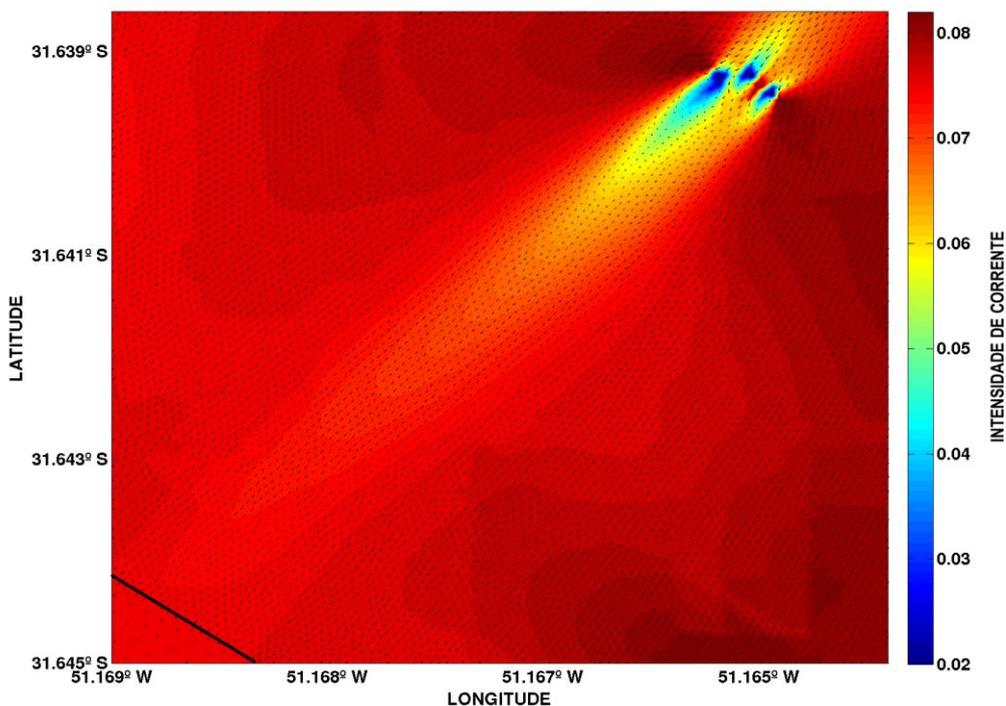


Figura 3.3 - Intensidade média da corrente na região localizada próximo ao Farol da Conceição durante o período de 365 dias de simulação. A região com as três turbinas utilizadas é apresentada, e os vetores em preto representam a direção das correntes. A escala de cores indica a intensidade das correntes em  $\text{m.s}^{-1}$ .

Estas condições mostradas pelos resultados da utilização de 3 conversores no sítio mostram um aumento relativo no tamanho da esteira que se cria quando a corrente passa pelos conversores,

fazendo assim que a corrente perca ainda mais intensidade, visto que ocorrem mais duas obstruções em seu curso. Além disso, há uma área maior atrás das turbinas que tem magnitude de corrente diminuídas (afetadas pelas turbinas) em comparação com o caso de uma turbina, restringindo a inserção de novas turbinas.

Portanto, com os próximos dois locais definidos em regiões adjacentes aos conversores, são implantados mais dois conversores nos locais com maior intensidade de corrente (passo 3), levando sempre em consideração as distâncias estabelecidas nas definições iniciais. Os resultados deste passo podem ser vistos na figura 3.4 que demonstra o comportamento da corrente nesta nova configuração com 5 turbinas.

Com a análise destes resultados é possível observar a cada simulação que sempre surgem mais dois possíveis locais com maior intensidade de corrente à jusante dos conversores anteriormente implantados, além de ocorrer um aumento significativo no tamanho da esteira. Neste cenário, a esteira que ocorre a nordeste dos conversores sofre um aumento, porém este aumento é mais significativo na esteira que ocorre a sudoeste dos conversores, alcançando a distância de 700 m e com as velocidades sendo reduzidas a valores inferiores a  $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

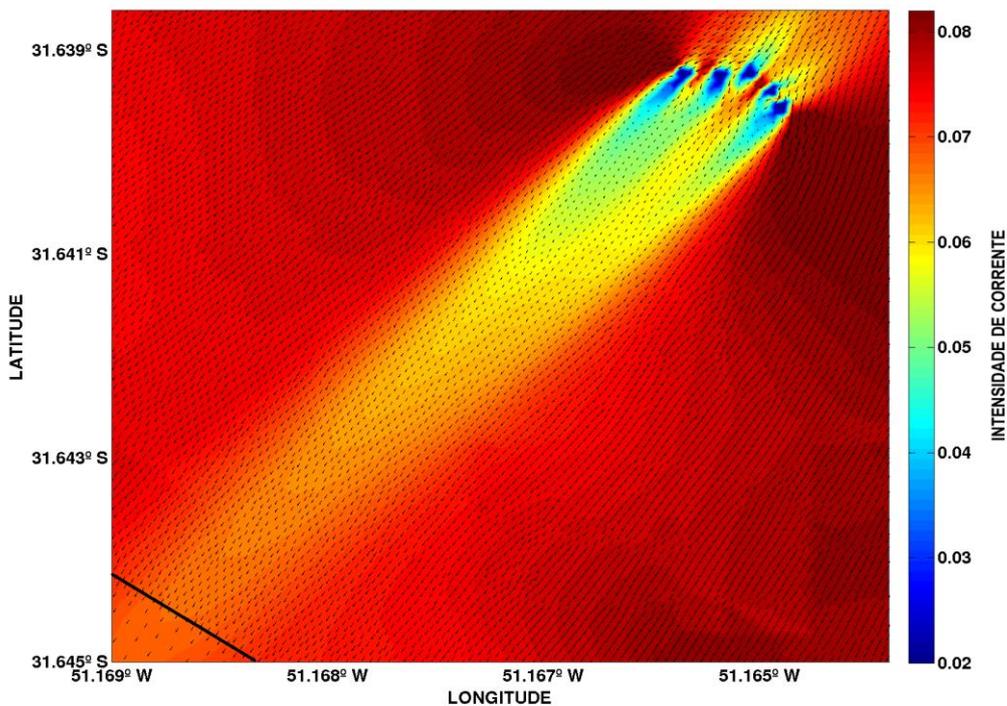


Figura 3.4 - Intensidade média da corrente na região localizada próximo ao Farol da Conceição durante o período de 365 dias de simulação. A região com as cinco turbinas utilizadas é apresentada, e os vetores em preto representam a direção das correntes. A escala de cores indica a intensidade das correntes em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Também é possível analisar que os locais favoráveis à instalação de novos conversores ocorrem sempre na parte externa e não no centro do sítio de conversão de energia figura 3.5. Estas condições fazem com que a configuração do sítio aumente em forma de diagonal. Apesar disso, a formação do arranjo não segue uma configuração simétrica. Isso ocorre devido ao fato do escoamento em torno das turbinas também não ter simetria. Assim, os resultados indicam que para esse tipo de problema a construção de arranjos simétricos podem não ser os mais indicados.

Por fim, de forma a complementar as observações realizadas, todas as simulações apresentam o mesmo padrão residual de velocidade de correntes direcionado preferencialmente para sudoeste, que pode ser explicado pela dominância de ventos de quadrante norte durante o ano na região da PCSB (Kirinus e Marques, 2013). Este resultado corrobora os resultados encontrados por (Marques et al., 2012; Kirinus e Marques, 2013, 2015; Kirinus et al., 2015), que analisando períodos distintos e diferentes configurações de turbinas verificaram o mesmo comportamento para as correntes.

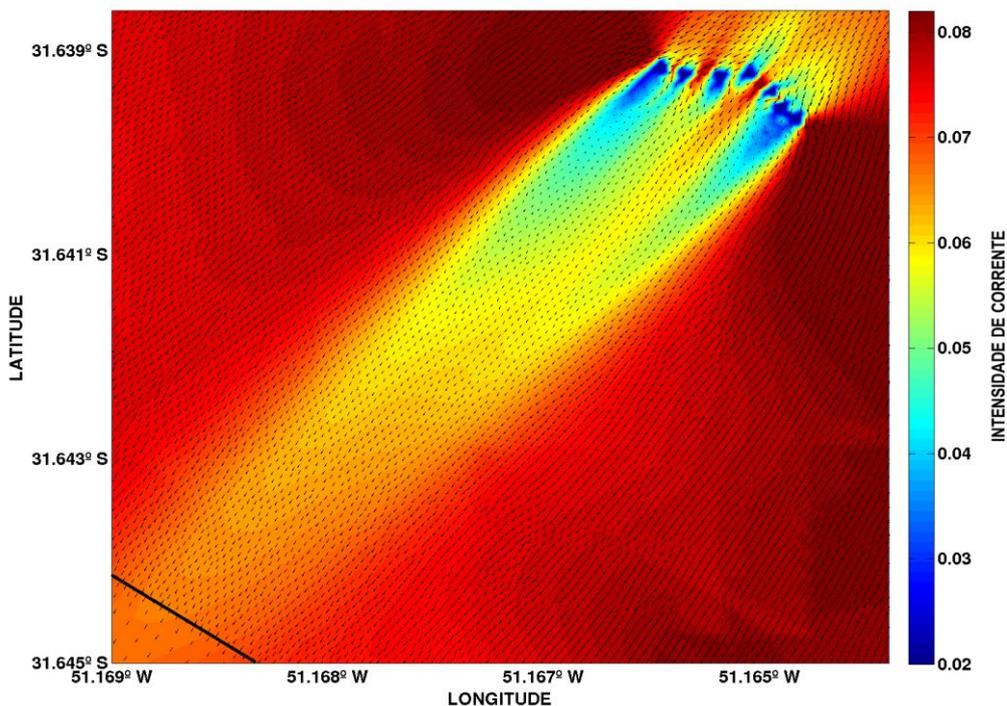


Figura 3.5 - Intensidade média da corrente na região localizada próximo ao Farol da Conceição durante o período de 365 dias de simulação. A região com as sete turbinas utilizadas é apresentada, e os vetores em preto representam a direção das correntes. A escala de cores indica a intensidade das correntes em  $m.s^{-1}$ .

### 3.2. Análise da potência convertida

A figura 3.6 apresenta um mosaico com o resultado da média da intensidade no desenvolvimento do sítio de conversores em todos os passos seguidos. Neste mosaico, é possível observar o crescimento gradativo da esteira após os conversores e por ela pode-se analisar que a implantação das turbinas realmente não poderia ocorrer na área da esteira, pois ali estão os locais com menos magnitude da corrente.

A figura 3.7 mostra o sítio com as turbinas e o mapa de cores representa a potência média convertida durante o período de 365 dias simulado para cada cenário. É importante ressaltar que estes resultados foram obtidos utilizando a aproximação numérica de uma turbina multidirecional, e neste caso o conversor utilizado foi do tipo helicoidal (Gorlov, 2010), visto que a mesma é capaz de converter energia independentemente da direção que o escoamento tem ao passar pelo rotor.

De acordo com estudos anteriores para esta região (Kirinus et al., 2012; Marques et al., 2012; Kirinus e Marques, 2015; Kirinus et al., 2015; Piola et al., 2008), as condições hidrodinâmicas caracterizadas pelo encontro de diferentes massas de água, influência de ventos e ondas, além de uma dinâmica complexa, favorecem a utilização de conversores de energia multidirecionais.

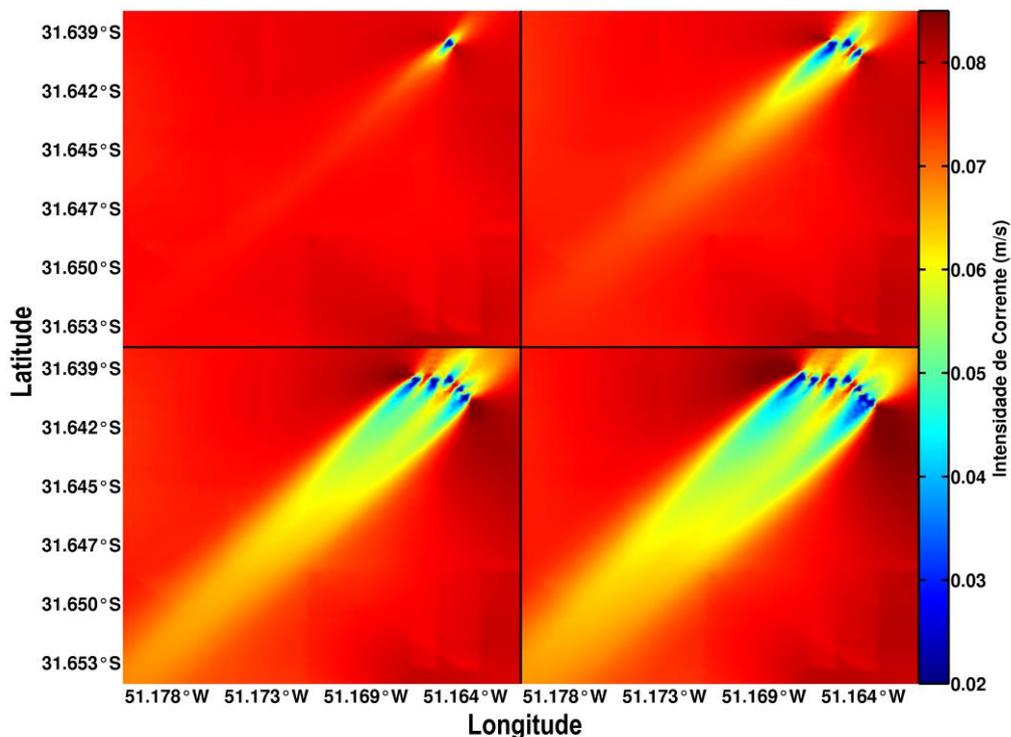


Figura 3.6 - Crescimento do sítio de conversores durante as simulações, começando com 1 conversor até os 7 conversores propostos para o estudo.

Estes resultados mostram que a potência média convertida pelas turbinas é da ordem de 20 kW. Conforme o sítio de conversores vai aumentando em estrutura, pode ser observado que as turbinas localizadas mais ao centro possuem maiores valores médios. Além disso, as médias de potência também vão sofrendo variações de uma mesma turbina para as diferentes configurações.

Quando o sítio possui três conversores, as turbinas 1, 2 e 3 possuem médias similares. Porém, quando o sítio está com uma configuração de cinco conversores, a turbina 3 sofre uma redução em seu valor médio, que faz com que a turbina 5 tenha sua média intensificada. Nesta configuração a turbina 4, é a que possui a menor média de conversão de energia.

Para o cenário composto por sete turbinas, o padrão observado de valores médios do cenário anterior é mantido. As turbinas com maiores médias são a 1 e a 2, as turbinas 3, 4 e 5 mostram uma pequena redução na sua potência média convertida, a turbina 6 é intensificada e a turbina 7 é a que mostra a menor média de conversão de energia de correntes.

Este resultado, onde as médias são alteradas de acordo com a configuração do sítio de conversores já foi observado por Kirinus et al. (2012); Marques et al. (2012); Kirinus e Marques (2015); Kirinus et al. (2015) utilizando quantidades de conversores e configurações diferentes. Por outro lado, a metodologia empregada neste trabalho tem a proposta de minimizar estas alterações. Entretanto, as variações sempre irão existir pelo fato do ambiente ser hidrodinamicamente não controlado e de alta variabilidade espacial e temporal.

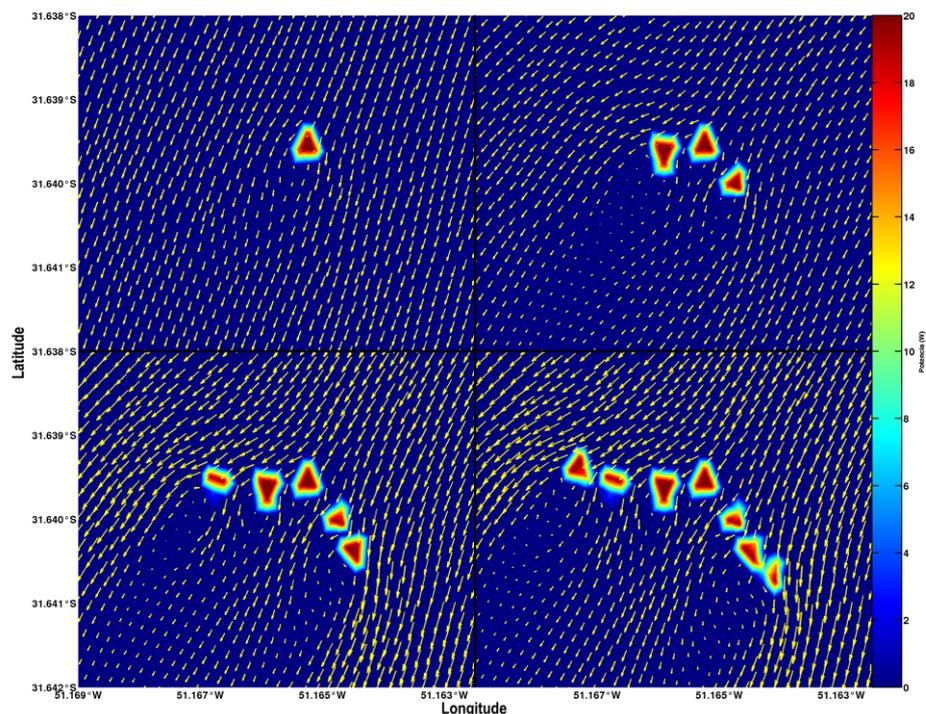


Figura 3.7 – Mosaico apresentando a potência média dos conversores em cada simulação. Os vetores em amarelo apresentam o sentido da corrente.

### 3.3. Séries Temporais

As figuras 3.8 a 3.11 mostram séries temporais de potência convertida para todas as configurações do sítio de conversores de energia. As séries temporais têm duração de 365 dias e todas mostram um padrão típico para a região de estudo, com os processos em escalas de variabilidade de curto período sendo dominados pela ação dos ventos, de acordo com estudos de Piola et al. (2005, 2008); Möller et al. (2008); Marques et al. (2009, 2010, 2012); Kirinus e Marques (2013, 2015); Kirinus et al. (2015), entre outros.

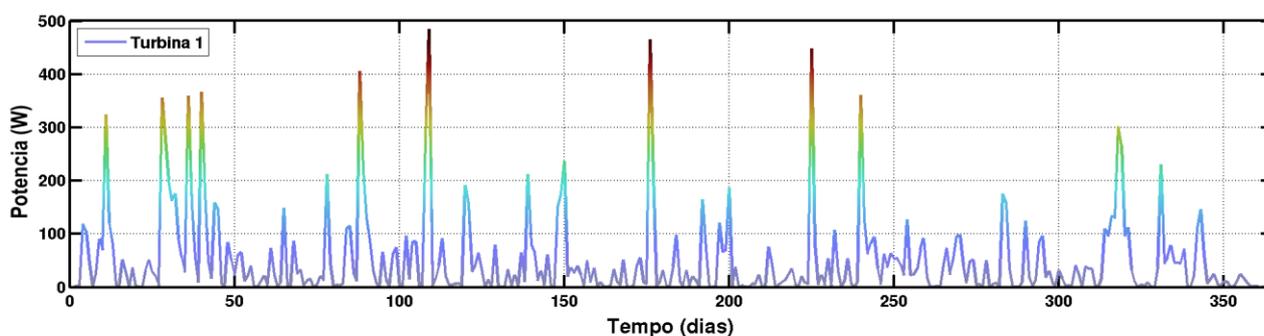


Figura 3.8 - Série temporal do sítio com 1 conversor durante a simulação de 365 dias.

Ainda é importante ressaltar que os resultados obtidos neste mesmo local de estudo por Kirinus e Marques (2013, 2015); Kirinus et al. (2015) mostraram que em simulações com e sem a utilização de barreiras, que são as estruturas físicas de suporte do conversor, indicaram que a presença da barreira, não afeta o padrão de temporalidade da conversão de energia.

A alta variabilidade no padrão de correntes pode ser facilmente observada nas séries de potência que alcançam picos superiores a 200  $W$  que ocorrem em escalas de poucas semanas, enquanto na maior parte do tempo, as potências convertidas não ultrapassam 100  $W$  (figuras 3.8 a 3.11).

Pode ser observado que durante o período simulado, o sítio com 1 conversor obteve picos de conversão que superaram 400  $W$  durante alguns períodos do ano, porém nas séries temporais para os outros cenários, o pico máximo ficou em torno de 350  $W$ . Esta condição ocorre pelo fato da utilização de 1 conversor afetar minimamente as condições energéticas das correntes costeiras. À medida que outros conversores são agrupados no sítio, mais energia cinética é convertida em

energia elétrica, de forma que menos energia disponível existe na área de restrição para que seja convertida por uma única turbina.

Outra característica que pode ser notada nestas séries temporais é que a configuração utilizada para a montagem do sítio de conversão de energia não gera variações temporais nos picos de ocorrência entre os diferentes conversores de energia. Este fato pode estar relacionado à estrutura de montagem assumida com forma diagonal, onde nenhum dos conversores de energia fica posicionado em regiões fortemente influenciadas pelas esteiras formadas no escoamento.

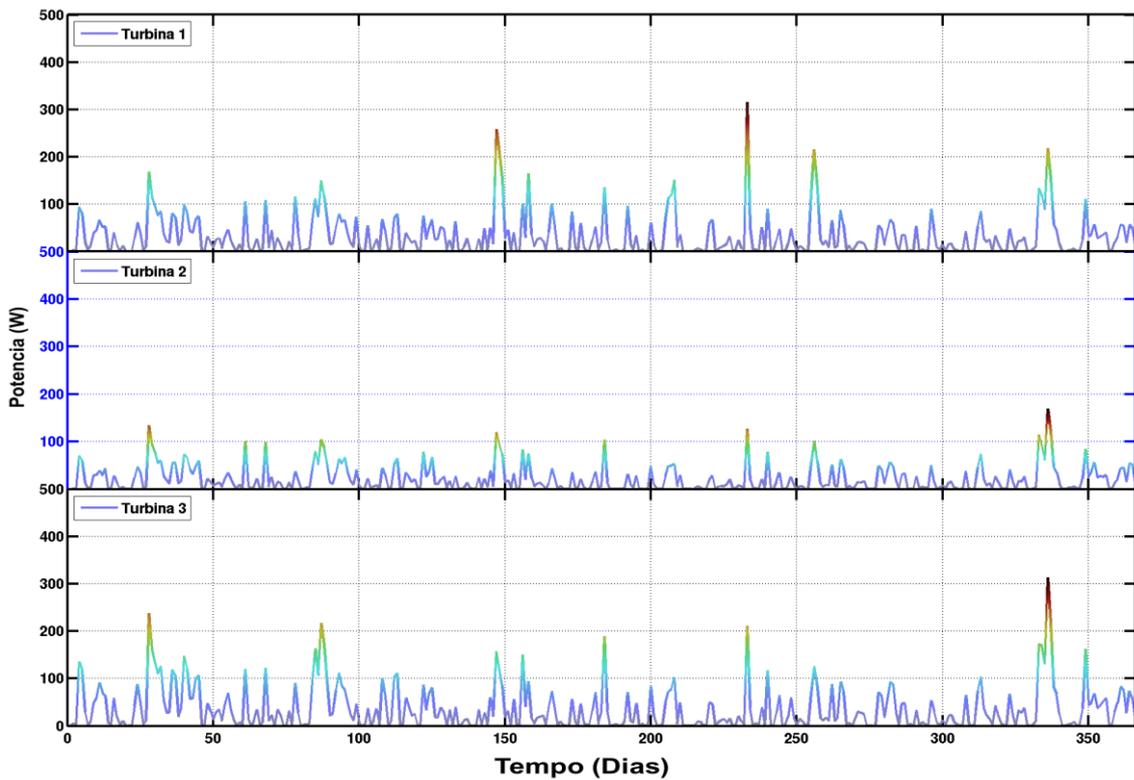


Figura 3.9 - Séries temporais do sítio com 3 conversores durante a simulação de 365 dias.

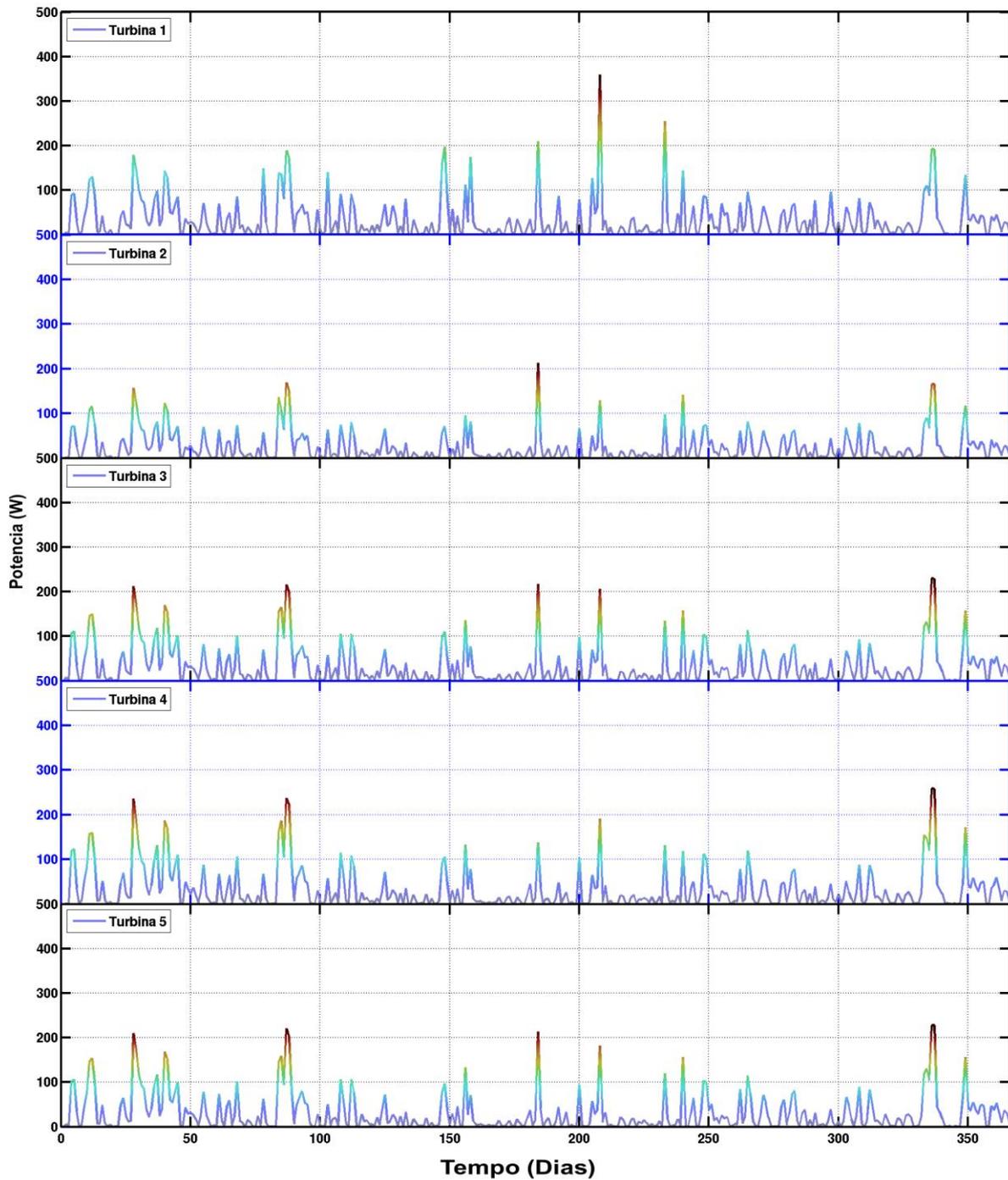


Figura 3.10 - Séries temporais do sítio com 5 conversores durante a simulação de 365 dias.

As séries temporais (figuras 3.8 a 3.11) indicam também que para os diferentes cenários considerados, apesar da variabilidade temporal dos picos de conversão de energia não ser alterada,

ocorrem variações nas taxas de conversão, de forma que um mesmo evento pode resultar em uma maior taxa de conversão de energia, em turbinas diferentes, dependendo da quantidade de conversores que compõem o sítio. Estas condições podem ser observadas em vários eventos extremos que ocorrem próximo aos dias 110, 180 ou 210, além de outros.

A intensificação das taxas de conversão de energia pelas turbinas depende da ocorrência de eventos extremos. Estas ocorrências podem acarretar maiores ou menores taxas de conversão em uma mesma turbina dependendo da configuração do sítio, para diferentes eventos ao longo mesmo ano.

Além disso, as diferentes composições de turbinas no sítio fazem com que um evento extremo seja mais bem aproveitado, por um maior número de turbinas, quando comparado com outra configuração. Esta situação ocorre, por exemplo, próximo ao dia 180, onde o cenário com 7 turbinas mostra taxas de conversão maiores ou iguais a 200  $W$  para todas as turbinas, fato que não acontece em outros cenários.

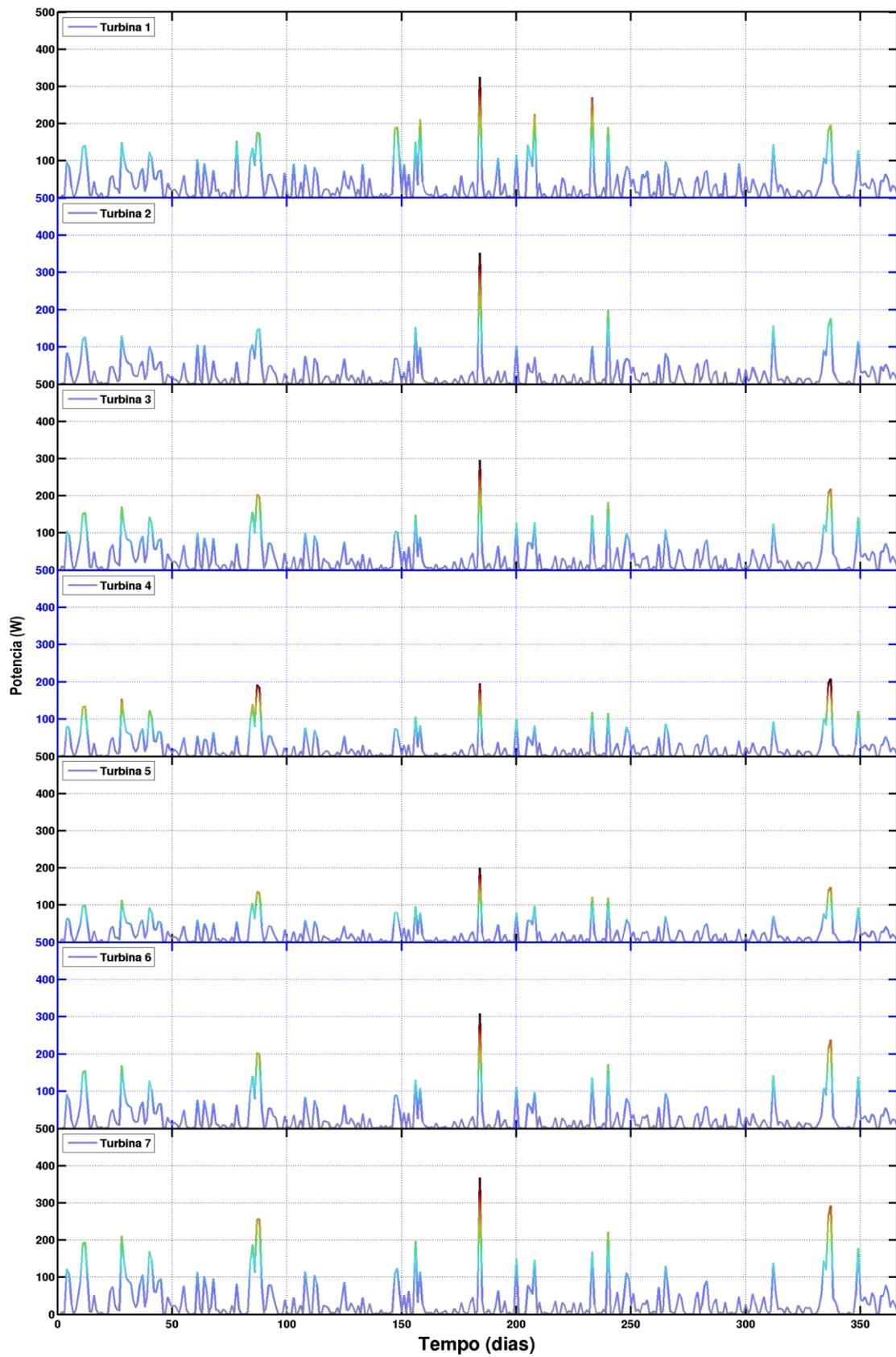


Figura 3.11 - Séries temporais do sítio com 7 conversores durante a simulação de 365 dias.

### 3.4. Cálculo dos valores de conversão

De posse dos resultados das séries temporais de potência, foi possível calcular os parâmetros estatísticos básicos que servem para representar de certa forma a eficiência dos sítios de conversores. Foram calculados os valores: máximos, a média e o desvio padrão para cada cenário utilizado. Para cada cenário foi calculado ainda o valor integrado do sítio, e os resultados são apresentados em Watts ( $W$ ).

Abaixo seguem as tabelas 6 a 9 contendo os cálculos da média, máxima, desvio padrão e valor integrado para os diferentes sítios de conversores de energia considerado neste estudo.

Tabela 6 - Tabela de valores: máximo, média, desvio padrão e valor integrado em  $W$  para a série temporal do sítio com 1 conversor.

<b>Sítio</b>	
<b>Potência</b>	<b>1</b>
<b>Máxima (W)</b>	484,88
<b>Média (W)</b>	50,66
<b>Desvio Padrão (W)</b>	25,78

Tabela 7 - Tabela de valores: máximo, média, desvio padrão e valor integrado em  $W$  para a série temporal do sítio com os 3 conversores.

<b>Sítio</b>			
<b>Potência</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Máxima (W)</b>	315,13	168,98	313,68
<b>Média (W)</b>	32,77	21,48	36,61
<b>Desvio Padrão (W)</b>	19,57	8,34	17,25
<b>Integrado da média (W)</b>	90,86		

Tabela 8 - Tabela de valores: máximo, média, desvio padrão e valor integrado em  $W$  para a série temporal do sítio com 5 conversores.

<i>Potência</i>	<b>Sítio</b>				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Máxima (W)</b>	359,88	212,47	231,03	259,66	227,80
<b>Média (W)</b>	33,38	24,33	32,56	32,47	31,24
<b>Desvio Padrão (W)</b>	19,60	9,08	21,75	40,06	30,64
<b>Integrado da média (W)</b>	153,98				

Tabela 9 - Tabela de valores: máximo, média, desvio padrão e valor integrado em  $W$  para a série temporal do sítio com 7 conversores

<i>Potência</i>	<b>Sítio</b>						
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>Máxima (W)</b>	235,24	352,18	295,96	208,58	199,52	308,71	367,57
<b>Média (W)</b>	34,30	25,18	31,43	22,82	20,29	26,05	34,24
<b>Desvio Padrão (W)</b>	16,74	4,98	24,10	26,30	4,21	15,36	54,86
<b>Integrado da média (W)</b>	194,31						

### 3.5. Comparação com arranjo proposto na literatura

No estudo realizado por Roc et al. (2014), os autores definiram que a melhor distância entre os conversores seria de 3 diâmetros (3D) na distância transversal e de 15 diâmetros (15D) na distância longitudinal, tendo com D o valor do diâmetro da turbina.

Com base nas definições deste estudo, foi realizada uma simulação dentro da área de restrição do sítio que está sendo considerado no presente trabalho utilizando a metodologia proposta por Roc et al. (2014). Os conversores foram implantados com estas distâncias transversais e longitudinais para permitir a análise e comparação dos resultados da conversão de energia pelas diferentes metodologias.

É importante ressaltar que os autores do estudo anterior realizaram análises em tanques de água, onde a velocidade das correntes era controlada, diferentemente dos resultados encontrados no

presente estudo. A figura 3.12 representa a configuração do sítio com sete conversores com a metodologia de distâncias fixas.

O comportamento da corrente ao passar pelos conversores é mostrado, e de maneira geral, em termos de intensidades e direção residual das correntes, não mostra significativas diferenças com relação ao cenário da figura 3.11. Neste cenário (figura 3.12) pode ser observada uma esteira que ocorre a nordeste dos conversores com uma extensão de 700 m.

A esteira a sudoeste também é amplificada quando comparada com o cenário de sete conversores apresentado anteriormente (figura 3.11). No caso do cenário de comparação, esta esteira tem uma extensão de 1.300m, porém a maior diferença é que neste cenário, vários conversores ficam posicionados em regiões onde as velocidades médias são reduzidas a valores inferiores a  $0.05 \text{ m.s}^{-1}$ .

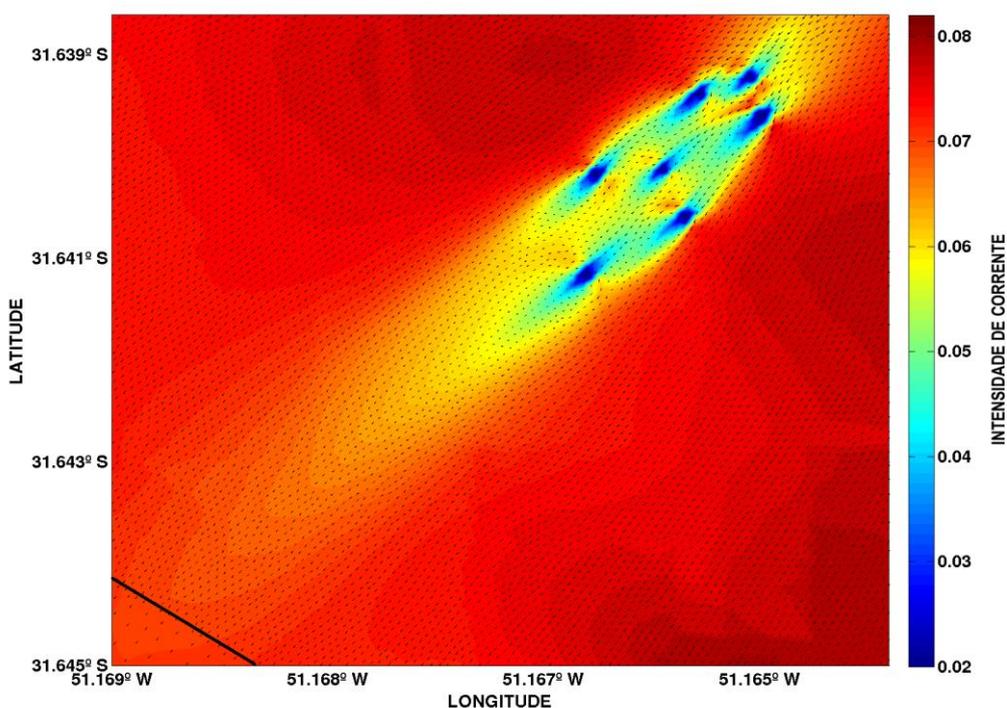


Figura 3.12 - Intensidade média da corrente na região localizada próximo ao Farol da Conceição durante o período de 365 dias de simulação. A região com as sete turbinas utilizadas é apresentada, e os vetores em preto representam a direção das correntes. A escala de cores indica a intensidade das correntes em  $\text{m.s}^{-1}$ .

A figura 3.13 mostra o sítio de conversores e sua potência média. Para este cenário de sete turbinas, o padrão observado de valores médios em torno de  $20 \text{ W}$  é mantido. Neste cenário, as

turbinas com maiores médias são as que se localizam nas regiões periféricas, diferentemente do cenário com sete turbinas apresentado anteriormente (figura 3.5).

Novamente, o resultado em que as médias são alteradas de acordo com a configuração do sítio de conversores corrobora as observações de Kirinus et al. (2012); Marques et al. (2012); Kirinus e Marques (2015); Kirinus et al. (2015) que utilizaram quantidades de conversores e configurações diferentes em seus estudos.

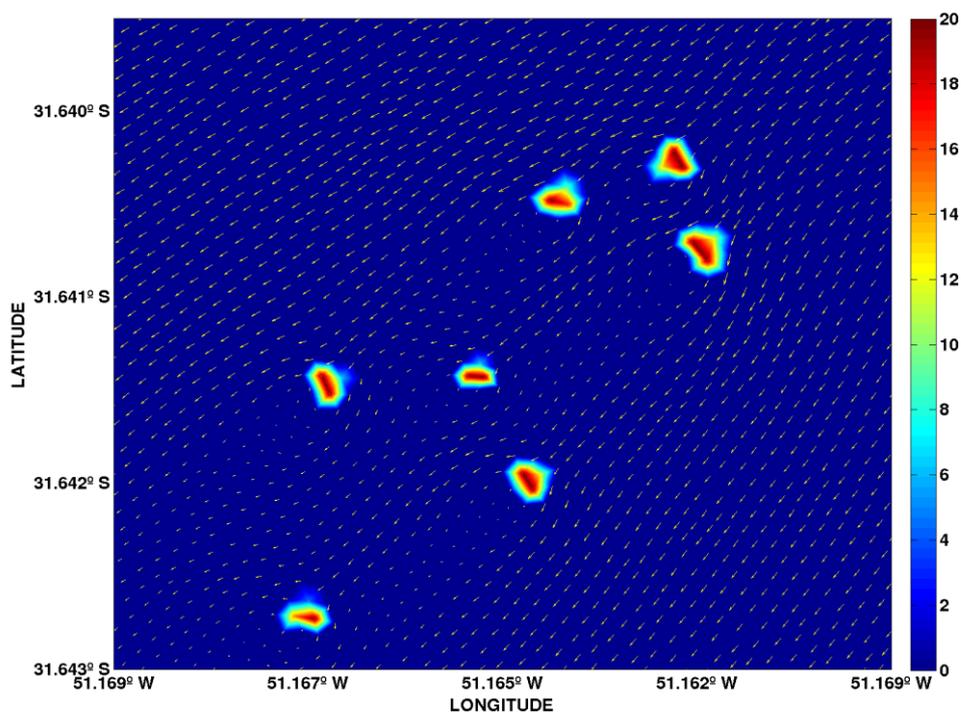


Figura 3.13 - Sítio com as 7 turbinas e o mapa de cores representando potência média convertida.

A figura 3.14 mostra as séries temporais de potência convertida para a configuração do sítio de conversores de energia utilizando a metodologia de Roc et al. (2014). A série temporal também tem duração de 365 dias e todas mostram o mesmo padrão típico observado anteriormente para a região de estudo, com os processos em escalas de variabilidade de curto período sendo dominados pela ação dos ventos.

A variabilidade no padrão de correntes é mantida nas séries de potência, que quase não alcançam picos superiores a 200 W, em escalas de poucas semanas. Na maior parte do tempo, as potências convertidas são menores que 100W (figura 3.14). A intensificação das taxas de conversão de energia pelas turbinas depende da ocorrência dos eventos extremos e estas ocorrências podem acarretar maiores ou menores taxas de conversão dependendo da configuração do sítio.

As composições de turbinas neste sítio fazem com que um evento extremo seja aproveitado de maneira similar em todos os conversores, quando comparado com as outras configurações. Entretanto, a característica mais marcante deste cenário é a intensa redução da potência convertida em todas as turbinas do sítio de conversores de energia.

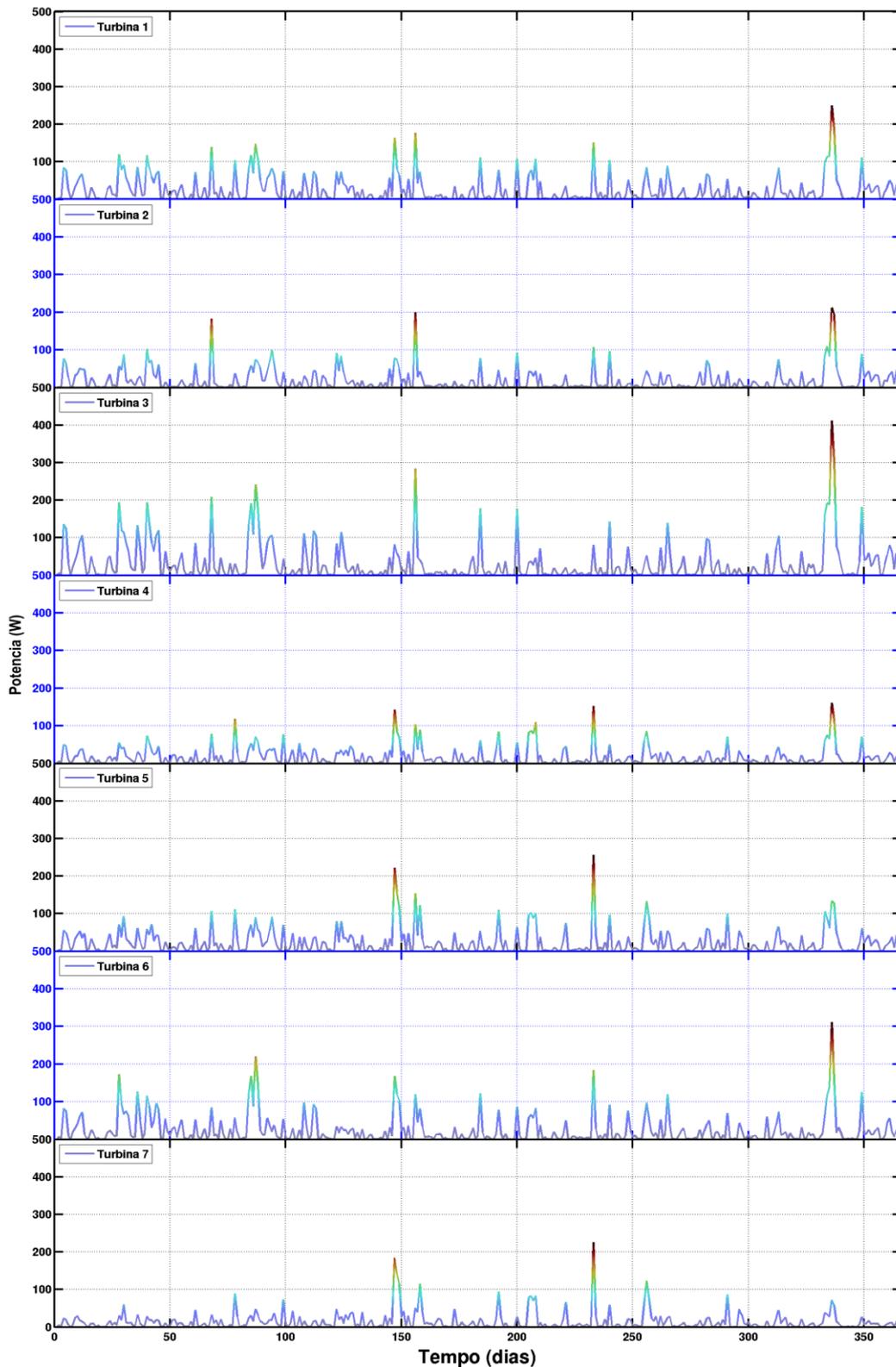


Figura 3.14 - Séries temporais do sítio com 7 conversores durante a simulação de 365 dias.

Abaixo é apresentada a tabela 10 contendo os cálculos da média, máxima, desvio padrão e valor integrado para o sítio que foi constituído através da metodologia de Roc et al. (2014).

Tabela 10 - Tabela de valores: máximo, média, desvio padrão e valor integrado em  $W$  para a série temporal do sítio com 7 conversores

	Sítio						
Potência	1	2	3	4	5	6	7
Máxima (W)	249,69	211,82	412,35	160,20	255,64	310,91	255,72
Média (W)	25,46	18,99	31,85	17,53	23,54	24,64	15,03
Desvio Padrão (W)	14,22	14,38	26,40	11,94	22,75	13,25	18,02
Integrado da média (W)	157,04						

Após terem sido extraídos os resultados das simulações, tanto a definida no passo a passo do trabalho, quanto na simulação de comparação, criou-se um gráfico (figura 3.15), onde é apresentado o crescimento da potência disponível (a cada simulação), com o aumento do número de conversores estudados no presente trabalho. Além disso, também é apresentado em vermelho a potência disponível obtida com um arranjo proposto na literatura. A figura 3.15, também apresenta o resultado obtido pela simulação de comparação, que utilizou as definições encontradas na literatura.

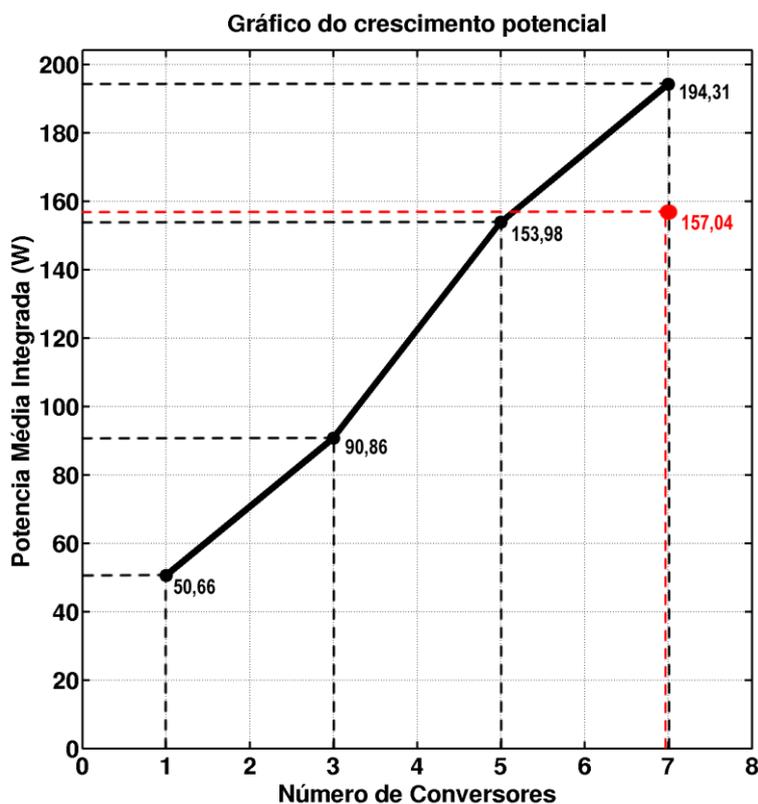


Figura 3.15 - Gráfico apresentando o crescimento potencial alcançado em cada passo do trabalho. Em vermelho é apresentado o resultado obtido pela simulação de comparação.

Os resultados apresentados no gráfico são os valores integrados das médias em cada simulação e o crescimento obtido em cada simulação mostrou que do primeiro resultado com (1 conversor) para o segundo resultado com (3 conversores), foi alcançado um crescimento de 79,35%. Já o crescimento potencial entre a segunda simulação para a terceira com (5 conversores) foi de 69,46% e o crescimento que ocorreu da terceira para quarta simulação (7 conversores) foi de 26,19%. Estes resultados nos mostram que o crescimento potencial do sítio não foi linear. Possivelmente um aumento maior do número de conversores (principalmente se ocorrer uma limitação lateral no sítio) poderá conduzir a uma saturação do sítio e o aumento do número de conversores poderá não conduzir a um aumento da potência disponível. Futuros estudos devem ser realizados para comprovar essa tendência.

Uma outra observação interessante é que em que comparação ao resultado obtido pela simulação da literatura com (7 conversores), alcançou um pouco mais do que o resultado realizado com (5 conversores), tendo uma diferença de apenas 1.98% a mais. Isso mostra que o sistema definido para a implantação dos conversores neste estudo é válido e positivo. Os resultados também mostram que, mesmo com o emprego de uma função de crescimento em um sistema com memória, a aplicação do método Design Construtal foi fundamental para melhorar o desempenho do conjunto de turbinas.

Como sugestão de trabalhos futuros alguns estudos podem ser realizados a partir dos resultados apresentados neste gráfico, levando em consideração o tamanho da área de restrição a ser usada, se a distância entre os conversores deve ser aumentada ou diminuída e se essa distância afetaria no potencial energético dos conversores.

## 4. CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um estudo numérico a respeito da avaliação geométrica da disposição de conversores de energia das correntes em energia elétrica em um sítio na PCSB empregando o método Design Construtal. Essa aplicação é inédita pois realiza a avaliação com o Design Construtal de um problema ainda não avaliado com essa metodologia e em um sítio real, o que não havia sido realizado até o momento.

Os objetivos definidos para este trabalho foram alcançados. Tendo como o primeiro deles a análise e observação da hidrodinâmica do local do estudo. Esta análise mostrou que a corrente tem um comportamento multidirecional e com esse resultado concluímos qual era o padrão dominante da corrente costeira sendo este um dos outros objetivos deste estudo, o que ajudou a definir qual o tipo de conversor utilizar nas simulações.

Alguns outros estudos já haviam sido realizados dentro da PCSB e este trabalho veio contribuir e comprovar que a área estudada realmente tem um potencial energético favorável para a implantação de um sítio de conversão de energia através das correntes oceânicas.

Com a implantação dos conversores através da utilização das definições feitas com o Design Construtal, foi possível concluir que o crescimento do sítio de conversores se dá sempre a jusante das turbinas, por ser este local com maior magnitude de corrente após o escoamento ultrapassar a barreira criada pelos conversores, sendo assim o sítio obteve um formato em “V”, sempre crescendo lateralmente, pois a esteira que se desenvolveu não permitiu que fosse implantado conversores naquela área.

O estudo desenvolvido permitiu obter um ganho de potência disponível de 23,73% em comparação com um arranjo simulado proposto na literatura. Desta forma, o método Design Construtal conduziu a uma importante recomendação teórica sobre o design neste tipo de aplicação.

Os resultados obtidos indicaram que a construção do arranjo segue um padrão assimétrico. Isso ocorreu devido ao comportamento do escoamento não ter um padrão definido, como ocorrem em experimentos controlados. Assim, as recomendações teóricas propostas em estudos de laboratório podem sofrer desvios quando aplicadas em sítios reais, o que não acontece na proposta de estudo realizada aqui, visto que a aplicação ocorreu em um sítio real.

Foi possível observar a partir da implantação de 5 conversores que o crescimento da potência disponível não foi tão intenso quanto a observada no aumento entre 3 e 5 conversores. Isso demonstra que em algum momento pode ocorrer uma saturação do sítio com relação ao aumento de conversores. Dessa forma, é interessante realizar futuros estudos com maior número de conversores e/ou diminuir a área de ocupação para identificar se ocorrerá algum comportamento de queda da potência disponível em algum momento com o aumento do número de conversores.

## 5. Referências

- ALAGER. **Associação Latino Americana de Geração de Energia Renovável – ENERGIA MAREMOTRIZ**, (2016).
- ASSAD, L. P. D. F., MANO, M. F., DE DECCO, H. T., JÚNIOR, A. R. T., E LANDAU, L. **Curso de Noções Básicas de Modelagem Hidrodinâmica Computacional e de Dispersão de Poluentes**. LAMCE - Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia, Rio de Janeiro, 2009
- BEJAN, A. **Street network theory of organization in nature**. *Journal of Advanced Transportation*, 1996. 30(2):85–107.
- BEJAN, A. **Shape and structure from engineering to nature**. Cambridge University Press, 2000
- BEJAN, A. E LORENTE, S. **The constructal law and the thermodynamics of flow systems with configuration**. *International Journal of Heat and Mass Transfers*, 2004.
- BEJAN, A. E LORENTE, S. **Design with Constructal Theory**. Wiley, Hoboken, 2008.
- BEJAN, A., LORENTE, S., MIGUEL, A. F., E REIS, A. H. **Constructal human dynamics, security and sustainability**. IOS Press, Amsterdam, 2009.
- BEJAN, A. E ZANE, J. P. **Design in Nature**. New York, Doubleday, 2012.
- BRAGA, M. F. E KRUSCHE, N. **Padrão de ventos em Rio Grande, RS, no período de 1992 a 1995**. *Atlântica*, 22:27–40. 2000.
- CAMPOS, G. A. D. P. **Estudo de Mecanismo Aplicado na Geração de Energia a partir de Correntes Oceânicas**. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- CHARLIER, R. H. E FINKL, C. W. **Ocean Energy. Tide and Tidal Power**. Springer, 1:262. 2009.
- CORPORATION, A. R. **Marine Power-Global Resource**. 2010.
- DEFNE, Z. **Multi-Criteria assessment of wave and tidal power along the atlantic coast of the southeastern USA**. Georgia Institute of Technology, 2010.
- FERNANDES, E., MARIÑO-TAPIA, I., DYER, K., E MÖLLER, O. **The attenuation of tidal and subtidal oscillations in the Patos Lagoon estuary**. *Ocean Dynamics*, 54(3-4):348–359, 2004.
- FISCHER, A. **Avaliação Do Potencial Energético De Correntes Oceânicas No Litoral Sul Do Brasil**. PhD thesis, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, 2014.
- FLATHER, R. A. **Results From a Storm Surge Prediction Model of the North-West European Continental Shelf for April, November and December 1973.pdf**. 1976.

- FONSECA, R. S. **Iluminação Elétrica**. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda. 1972.
- GOMES, M. D. N., COSTA, C. A. D. O. DE, D. M. J., RICARDO, R. L. P., ISOLDI, L. A., SANTOS, E. D. D., E ROCHA, L. A. O. **Análise Computacional E Geométrica Com Design Construtal De Um Dispositivo Conversor De Energia Das Ondas Do Mar Em Energia Elétrica Do Tipo Coluna De Água Oscilante Submetido A Um Espectro De Ondas**. Revista Interdisciplinar da Pesquisa em Engenharia. 2016.
- GORLOV, B. A. **Tidal Energy**. Academic Press, pages 2955–2960. 2001.
- GORLOV, B. A. **Helical Turbine and Fish Safety**. pages 1–14. 2010.
- HAMMERFEST STROM. **Blue Concept**. 2011.
- HAMMONS, T. J. **Tidal Power**. *Proceedings of the IEEE*, 8(3):419–433. 1993.
- HEMER, D., BEBIER, J. C., E DELÉAGE, J. P. **Uma História da Energia**. Editora: Universidade de Brasília. 1993.
- HERVOUET, J. M. **Compatibility between finite volumes and finite elements using solutions of shallow water equations for substance transport**. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2007.
- HERVOUET, J. M. E VAN HAREN, L. **Recent advances in numerical methods for fluid flows**. *Floodplain processes*, pages 183–214. 1996.
- KINSEY, T., DUMAS, G., LALANDE, G., RUEL, J., MÉHUT, A., VIAROUGE, P., LEMAY, J., E JEAN, Y. **Prototype testing of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils**. *Journal Renewable Energy*, 36:1710–1718. 2010.
- KIRINUS, E. E MARQUES, W. **Viability of the application of marine current power generators in the south Brazilian shelf**. *Applied Energy*, 155:23–34. 2015.
- KIRINUS, E. D. P. E MARQUES, W. C. **Avaliação do Potencial Passível de Conversão em Energia Elétrica das Correntes na Plataforma Continental Sul Brasileira**. Universidade Federal do Rio Grande, Instituto de Matemática, Estatística e Física, Pós Graduação em Modelagem Computacional. 2013.
- KIRINUS, E. D. P. E MARQUES, W. C. **Viabilidade do uso de turbinas hidrocínéticas na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira**. *Scientia Plena*, 11:1–10. 2014.
- KIRINUS, E. D. P., MARQUES, W. C., JUNG, B. M., STRINGARI, C. E., E MATZENAUER, H. B. **Evaluating current power availability for energy conversion along the Southern Brazilian Shelf**. *International Journal of Marine Energy*, 10:97–112. 2015.
- KIRINUS, E. D. P., MARQUES, W. C., E MATZENAUER, H. B. **Insight into the usage of turbine current converters on the Southern Brazilian Shelf**. 9(2):113–124. 2014.

- KIRINUS, E. P., MARQUES, W. C., E STRINGARI, C. E. **Viabilidade de conversão da energia de correntes marinhas na Plataforma Continental Sul do Brasil**. *Vetor*, 22:83–103. 2012.
- LAUNDER, B. E. E SPALDING, D. B. **Lectures in mathematical models of turbulence**. Academic Press, London, England. 1972.
- LEIJON, M. E LUNDIN, M. G. U. **Ocean Energy**. Uppsala University, Sweden, pages 1–21. 2005.
- LUZNIK, L., FLACK, K. A., LUST, E. E., E TAYLOR, K. **The effect of surface waves on the performance characteristics of a model tidal turbine**. *Renewable Energy*, 58:108–114. 2013.
- MARQUES, W. C. **The temporal variability of the freshwater discharge and water levels at the Patos Lagoon, Brazil**. *International Journal of Geosciences*. 2012.
- MARQUES, W. C., FERNANDES, E. H., MOLLER JR, O. O., MORAES, B. C., E MALCHEREK, A. **Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf**. *Journal of Geophysical Research*. 2010.
- MARQUES, W. C., FERNANDES, E. H. L., MALCHEREK, A., E ROCHA, L. A. O. **Energy converting structures in the Southern Brazilian Shelf: Energy Conversion and its influence on the hydrodynamic and Morphodynamic processes**. *Journal of Geophysical Research*. 2012.
- MARQUES, W. C., FERNANDES, E. H. L., MONTEIRO, I. O., E MÖLLER, O. O. **Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil**. *Continental Shelf Research*, 29:556–571. 2009.
- MATANO, R. P., PALMA, E. D., PIOLA, A. R., SCIENCES, A., BLANCA, B., E AIRES, B. **The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the Southwestern Atlantic Shelf circulation**. pages 983–995. 2010.
- MÖLLER, O. E CASTAING, P. **Hydrographical Characteristics of the Estuarine area of Patos Lagoon (30°S, Brazil)**. G.M.E. Perillo, M.C. Piccolo & M.P. Quivira, pages 83–110. 1999.
- MÖLLER, O., CASTAING, P., FERNANDES, E., E LAZURE, P. **Tidal frequency dynamics of a southern Brazil coastal lagoon: choking and short period forced oscillations**. *Estuaries and Coasts*, 30(2):311–320. 2007.
- MÖLLER, O. O., PIOLA, A. R., FREITAS, A. C., E CAMPOS, E. J. D. **The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America**. 28:1607–1624. 2008.
- NETO, P. B. L., SAAVEDRA, O. R., CAMELO, N. J., DE SOUZA RIBEIRO, L. A., E FERREIRA, R. M. **Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências**. 19(2):219–232. 2011.

- PALMA, E. D., MATANO, R. P., E PIOLA, A. R. **A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Stratified ocean response to local and offshore forcing.** 113(November):1–22. 2008.
- PEREIRA, J. T. B., KIRINUS, E. D. P., MARQUES, W. C., GANDRA, T. B. R., BARROS, G. P. D., E MATZENAUER, H. B. **Exploring the Project Potential of Marine Current Turbines: A Case Study in the Southern Brazilian Shelf Region.** International Journal of Geosciences, 05(13):1547–1560. 2014.
- PEZZATO, B. C., KIRINUS, E. P., E MARQUES, W. C. **Estudo da hidrodinâmica de diferentes geometrias de sítios de conversão de energia das correntes.** 11:1–8. 2015.
- PIOLA, A., MÖLLER, O., E PALMA, E. **El impacto del Plata sobre el Océano Atlántico.** Ciencia hoy, 14(82)(1666-5171):28–37. 2004.
- PIOLA, A. R., MATANO, R. P., PALMA, E. D., MOLLER, O. O., E CAMPOS, E. J. **The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf.** Geophysical Research Letters, 32:L01603. 2005.
- PIOLA, A. R., ROMERO, S. I., E ZAJACZKOVSKI, U. **Space-time variability of the Plata plume inferred from ocean color.** Continental Shelf Research, 28:1556–1567. 2008.
- PONTA, F. L. E JACOVKIS, P. M. **Marine-current power generation by diffuser-augmented floating hydro-turbines.** Renewable Energy. 2007.
- REIS, A. H. **Constructal Theory: From Engineering to Physics, and How Flow Systems Develop Shape and Structure.** 59(September):269–282. 2006.
- REPORT, G. S. **Global Status Report 2013.** REN21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2013.
- ROC, T., GREAVES, D., THYNG, K. M., E CONLEY, D. C. **Tidal turbine representation in an ocean circulation model: Towards realistic applications.** Ocean Engineering, 78:95–111. 2014.
- ROURKE, F. O., BOYLE, F., E REYNOLDS, A. **Marine current energy devices: Current status and possible future applications in Ireland.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14:1026–1036. 2010.
- SIEMENS, A. R. **SeaGen Fact Sheet.** 2012.
- SILVA, E. F. D. E., JÚNIOR, S. C. G., E RODRIGUES, K. D. **Um Estudo Sobre o Aproveitamento da Energia Dos Oceanos - Energia Das Ondas: Renovável, Economicamente Viável e Limpa.** 2014.
- SOARES, R. F. E NETO, A. D. S. **Turbulência dos Fluidos.** 2014.

- STANSBY, P. E. STALLARD, T. **Fast optimisation of tidal stream turbine positions for power generation in small arrays with low blockage based on superposition of self-similar far-wake velocity deficit profiles.** *Renewable Energy*, 92:366–375. 2016.
- SWEERS, U. **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. 1976.
- TANEMBAUM, A. **Sistemas Operacionais Modernos.** Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro. 2001.
- TESSMER, H. **Uma síntese histórica da evolução do consumo de energia pelo homem.** 2002.
- TWIDELL, J. E. WEIR, T. **Renewable energy resources.** New York, Taylor & Francis., 2ª ed. 2006.
- VICHI, F. M., MANSOR, M. T. C., VICHI, F. M., E MANSOR, M. T. C. **Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial.** *Quimica Nova*, 32(3):757–767. 2009.
- VIEGAS, J. S. E FRANZ, A. F. H. **Hidrologia do Canal de São Gonçalo.** Technical report. 2006.