



VII SEMINÁRIO e WORKSHOP em ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, 23 a 25 de Novembro de 2016

ANÁLISE E APLICAÇÃO DO DESIGN CONSTRUTAL PARA AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE SÍTIOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA NA PLATAFORMA CONTINENTAL SUL DO BRASIL

Régis Lucas Timm¹, Phelype Haron Oleinik², Wiliam Correa Marques¹, Elizaldo Domingues dos Santos³

¹Universidade Federal do Rio Grande
Instituto de Matemática, Estatística e Física
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: restim@live.com

e-mail: wiliam_marques@yahoo.com.br

² Universidade Federal do Rio Grande
Graduando no Programa de Engenharia Civil, Costeira e Portuária
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: phe.h.o1@gmail.com

³ Universidade Federal do Rio Grande
Escola de Engenharia
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil
e-mail: elizaldodossantos@gmail.com

RESUMO

As necessidades energéticas do homem estão em constante evolução. Vivemos em um planeta onde a mudança do estilo de vida da população é constante e a nossa dependência pela energia é cada vez maior. Sendo assim, a busca por fontes de energias limpas e renováveis que tenham baixo impacto ambiental é incansável. Dentro da diversificação de fontes de recursos energéticos renováveis os oceanos surgem como uma das opções a serem estudadas. O presente estudo apresenta, através de Modelagem Numérica, a implantação de um sítio de conversores na Plataforma Continental Sul do Brasil de forma que utiliza o método de Design Construtal no auxílio da configuração da matriz de turbinas dentro do sítio. Ao final do estudo foram obtidos valores médios de conversão de energia nas 3 turbinas e a média total do sítio, também foi analisado o comportamento de cada conversor no período simulado e feita uma comparação entre eles, considerando a quantidade de energia convertida e o período em que cada conversor teve seu pico máximo de conversão.

Keywords: Energia renovável, Modelagem numérica, Conversão de energia, Design Construtal, Configuração de sítios de conversão.

1. INTRODUÇÃO

As necessidades energéticas do homem estão em constante evolução. Vivemos em um planeta onde a mudança do estilo de vida da população é constante e a nossa dependência pela energia é cada vez maior. Sendo assim, a busca por fontes de energias limpas e renováveis que tenham baixo impacto ambiental é incansável.

Atualmente as grandes potências mundiais mantêm fortes investimentos na busca de energias renováveis, mas não conseguem se tornar totalmente independentes das fontes de combustíveis fósseis. Os países vêm investindo na diversificação das fontes de energia como meio de ampliação da sua matriz energética. Dentro da diversificação de fontes de recursos energéticos renováveis 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 de marés, energia de correntes oceânicas, energia térmica dos oceanos e gradientes de salinidade.

(Piola et al., 2008), mostraram que a região da Plataforma Continental do Sul do Brasil (PCSB) apresenta uma alta dinâmica devido ao encontro de várias massas de água, tanto de origem tropical, quanto de origem subantártica, além de um grande aporte continental que geram assim fortes gradientes termoalinos. Tem sua circulação influenciada principalmente pelo Rio da Prata, por ventos bidirecionais de Nordeste - Sudoeste e pela corrente de contorno oeste que fluem pela quebra da plataforma, além de apresentar uma forte diferença sazonal devido a mudanças do vento.

Na PCSB foram realizados estudos sobre a influência da instalação de turbinas hidrocinéticas nesta área, identificando quais seriam as possíveis alterações nos processos naturais hidrodinâmicos e morfodinâmicos (Marques et al., 2012). Os resultados mostraram que o local tem grande possibilidade de uso para conversão de energia através das correntes costeiras, chegando a um valor integrado médio anual de aproximadamente $5 \text{ GW}\cdot\text{ano}^{-1}$, com a utilização de 6 conversores axiais.

Em um estudo mais aprofundado (Kirinus et al., 2012), demonstraram que existem duas regiões na PCSB, localizada entre 28°S e 35°S com bom potencial energético, sendo a melhor região localizada no entorno do Farol da Conceição, distante 11 km da costa com profundidade de 18 m. Nesta região, a produção média de energia pode alcançar $40 \text{ MW}\cdot\text{h}$ e ainda valores integrados de $13 \text{ GWh}\cdot\text{ano}^{-1}$.

Em um trabalho mais recente (Pezzato et al., 2015) demonstraram qual seria o melhor posicionamento em relação a costa, de um sítio de 10 conversores estando todos separados em distâncias iguais entre si. Por outro lado, este trabalho procura encontrar qual a melhor configuração dos conversores para que se tenha a maior taxa de conversão de energia, de forma que para que o posicionamento dos conversores seja definido, será levado em consideração a intensidade média das correntes nas regiões circunvizinhas dos conversores, na região próximo ao Farol da Conceição.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Modelo Hidrodinâmico

Para que este trabalho seja desenvolvido o modelo numérico para simulações hidrodinâmicas que está sendo utilizado é o TELEMAC3D (www.opentelemac.org). Este modelo utiliza as equações de Navier-Stokes, levando em consideração as variáveis locais, tais como, a superfície livre do mar, as componentes da velocidade da corrente e traçadores da água do mar. O modelo considera as aproximações de pressão hidrostática e de Boussinesq. O modelo é baseado em técnicas de elementos finitos para resolver as equações da hidrodinâmica (Hervouet, 2007) e conta com o sistema de coordenadas sigma para discretização vertical.

2.2 Módulo de conversão de energia

O módulo de conversão de energia utiliza a equação padrão de turbinas (equação 1) para calcular a energia elétrica gerada, em Watts (W), a partir da velocidade do fluxo da corrente que passa pelos conversores. Utilizando o princípio da conservação de energia, a velocidade da corrente é obtida em cada intervalo de tempo através do modelo hidrodinâmico que transfere para o módulo de conversão de energia. Uma parte da velocidade é convertida em energia elétrica, a velocidade é então atualizada para manter o balanço de energia do modelo hidrodinâmico TELEMAC3D.

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

Onde: P é a potência elétrica convertida em W, ρ é a massa específica do fluido, μ é o coeficiente de eficiência da turbina, A é a área do conversor e v é intensidade da corrente. A tabela 1 indica quais são os parâmetros utilizados pelo módulo de conversão de energia.

Para que o estudo de conversão da corrente oceânica em energia elétrica possa ser realizado foram utilizadas simulações com períodos de 1 ano (365 dias) climatológicos. Este ano equivale à média climatológica compreendida entre os dias nos anos de 2003 à 2014. Estas médias foram calculadas extraindo dados oceânicos a partir do modelo de circulação oceânica global HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*) e dados globais atmosféricos do NCEP/NCAR (*National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research*) Reanalysis 1 e do Laboratório de Pesquisas do Sistema Terrestre Earth System Research Laboratory e a Divisão Científica Física PSD (*Physical Sciences Division*) da N.O.A.A..

Tabela 1: Parâmetros da turbina

Parâmetros	Valor
Velocidade de início de movimento	0,2 m/s
Velocidade nominal	1,5 m/s
Coefficiente de eficiência da turbina (μ)	0,35
Potência nominal	170 kW
Altura da turbina	14m
Raio da turbina	10m

O sítio de conversores foi definido com um tamanho de 2 km por 2 km, à aproximadamente 10 km da costa, com aproximadamente 18 m de profundidade. A orientação da configuração dos conversores tende a se caracterizar em relação a direção da corrente, sua intensidade e comportamento ao passar pelos conversores. De forma que o sítio de conversores é construído de forma evolutiva conforme são realizadas as simulações.

2.3 Design Construtal

Um outro método utilizado neste estudo foi o de Design Construtal. A lei construtal é a lei da física que explica o fenômeno do sistema de fluxo (escoamento) em sistemas da natureza, sejam animados ou inanimados, mostrando que as formas vistas na natureza (árvores, rios, pulmões, animais e outros) são determinísticos e seguem um princípio físico (Lei Construtal). Esse mesmo princípio pode ser aplicado em problemas de engenharia (através do Design Construtal) para racionalizar os sistemas de fluxo existentes.

Esta lei foi afirmada por Adrian Bejan em 1996, da seguinte forma: *“Para que um sistema de tamanho finito sobreviva no tempo, ele deve evoluir de tal modo que proporcione um acesso mais fácil para as correntes impostas através dele.”* (Bejan e Lorente, 2008), (Bejan e Zane, 2012)

O método Design Construtal segue o princípio de restrições e objetivos para aplicação da Lei Construtal. No caso do presente trabalho o objetivo é maximizar a potência disponível nos conversores e a área máxima do sítio é a restrição geométrica do problema. No presente trabalho foi definida a maximização da potência disponível nos conversores como a função objetivo do problema. A avaliação geométrica é realizada da seguinte forma:

- 1 - Definir uma área máxima a ser ocupada pelas turbinas no sítio;
- 2 - Inserir uma turbina em uma posição específica no sítio, esta posição será central tanto na coordenada X quanto na coordenada Y, ou seja, a turbina será posicionada na parte central da área de restrição do sítio;
- 3 - Realizar a simulação do escoamento obtendo a potência disponível no dispositivo e os campos de velocidade no seu entorno;
- 4 - Definir um ponto dentro da área de ocupação onde a velocidade seja a maior média no tempo simulado;
- 5 - Verificar se esse ponto de maior média de velocidade ocorre em uma posição que a inserção de uma nova turbina não cause interferência com a primeira turbina nem exceda a dimensão do sítio estabelecido;
- 6 - Inserir a nova turbina na posição definida (considerando a restrição do sítio e restrição de posição das turbinas anteriores);
- 7 - Realizar uma nova simulação com duas turbinas obtendo os campos de velocidades e a potência disponível;
- 8 - Após a obtenção dos campos de velocidades com duas turbinas, verificar o ponto de maior média de velocidade dentro das restrições impostas (área do sítio e região cuja inserção de uma nova turbina não cause interferência com as turbinas anteriores);
- 9 - O processo deve ser repetido com “N” turbinas até a ocupação do sítio.

A Figura 1 demonstra como será realizada esta configuração e como ocorrerá o crescimento dos conversores dentro da área de restrição do sítio até sua ocupação total. É importante ressaltar que, em função do tempo de processamento para a simulação do fenômeno físico para um ano meteorológico, foi definida como função de avanço, que ao invés de testar exaustivamente um arranjo pré-determinado (o que iria requerer um conjunto muito grande de simulações e que tornaria inviável o estudo), sendo assim, os conversores serão implantados de 2 em 2, nos locais com maior média de velocidade encontrados os locais circunvizinhos aos conversores.



Figura 1: Passo 1: Área de restrição e a 1ª turbina implantada no centro do sítio; Passo 2: Mostra os locais onde as próximas turbinas serão implantadas nos locais de maior média de velocidade; Passo 3: Demonstra a forma geométrica em que o sítio crescerá dentro da área de restrição.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi realizada uma simulação de hidrodinâmica para estabelecer qual o local com maior intensidade média de corrente dentro da área do estudo, a Fig.2 mostra o resultado da simulação com sua intensidade média para os dias simulados.

Este resultado está de acordo com o estudo apresentado por (Costa e Möller, 2011), onde analisa que esta região de estudo possui uma alta variabilidade sazonal e interanual no campo de vento (Piola et al., 2005), onde ventos de NE, dominantes no verão, forçam um deslocamento das águas constituintes da Pluma do Rio da Prata para o Sul e ventos de Sudoeste (SO), presentes no inverno, geram um deslocamento das mesmas para Norte (Möller et al., 2008). 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 sinóptica e pelo sistema de brisa costeira (Braga e Krusche, 2000). Os ventos predominantes na costa do Rio Grande do Sul são de origem 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) o que possibilita a entrada de um maior número de frentes meteorológicas e o aumento na frequência de ocorrência de ventos de SO.

A realização desta simulação permitiu definir o local do sítio em um espaço delimitado com dimensões de 2 km x 2 km, de forma que esta área é apresentada em destaque na Figura 2. Utilizando estas dimensões para o sítio de conversores foram simulados dois cenários, sendo o primeiro com um 1 conversor Figura 3, onde é apresentada a intensidade média da corrente. Este resultado mostra que os locais circunvizinhos ao conversor ocorrem as maiores intensidades, sendo assim os locais com maior probabilidade de implantação dos próximos conversores. A Figura 4, demonstra em isolinhas estes locais com maior destaque.

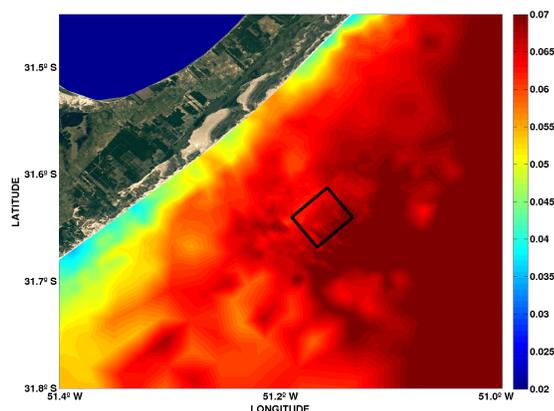


Figura 2: Local onde o estudo será realizado e a representação da sua intensidade média.

Este resultado ocorre porque o fluxo que passa através do rotor produz uma queda de pressão que depois será parcialmente compensada pela redução de superfície livre (Myers e Bahaj, 2010), advectando a jusante do dispositivo. Isto resulta em um aumento constante na elevação da superfície livre da turbina, com quedas acentuadas em toda a região da turbina e constante aumento na jusante das turbinas.

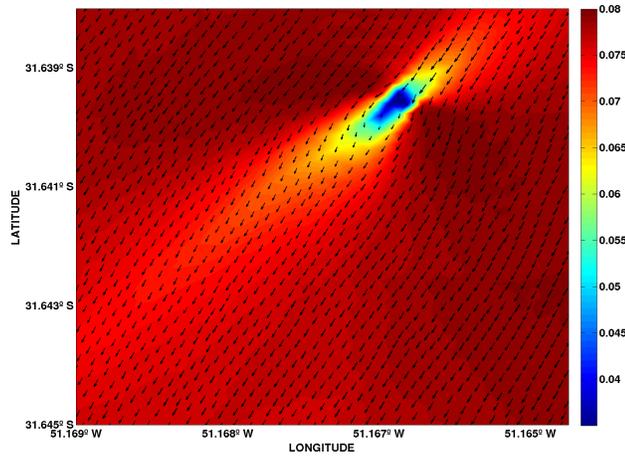


Figura 3: Sítio com 1 conversor identificando os locais para com maior intensidade de corrente.

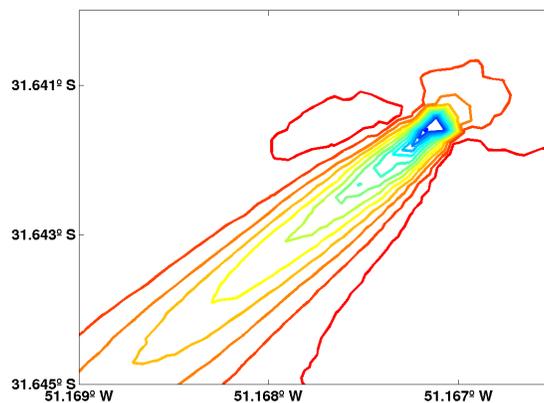


Figura 4: Resultado em isolinha que mostra os locais mais propícios para a implantação de mais dois conversores à jusante do conversor.

Com a intensidade calculada e a localização dos locais com maiores médias de intensidades de corrente, um outro cenário com mais 2 conversores foi simulado Figura 5, sendo estes conversores implantados nos locais com maior intensidade observados no primeiro cenário, sendo estes na jusante da turbina.

Após o término da simulação foi possível observar que já existem mais dois locais com possibilidade de implantação de mais dois conversores, estes locais são circunvizinhos às duas turbinas implantadas no segundo cenário.

Uma outra observação importante que foi possível obter é que a partir da implantação de mais dois conversores à uma queda considerável da intensidade da corrente logo após o fluxo passar pelos conversores, criando assim um efeito esteira (Lu et al., 2012) formando vórtices que se deslocam com uma velocidade inferior a inicial por mais de 400 m de distância à partir das turbinas. Figura 6

É importante destacar que para a implantação dos conversores a distância que deve ser considerada é de no mínimo 2D (2 diâmetros de distância entre um conversor e outro) dentro da área de maior média de intensidade de corrente, sendo D o diâmetro da turbina. O estudo de (Myers e Bahaj, 2005) foi utilizado como parâmetro de distanciamento entre conversores. Em função de restrições construtivas, é possível que o sítio necessite ter uma restrição mais severa. O efeito dessa restrição deve ser fruto de futuros trabalhos.

Também é importante verificar a esteira menor que se desenvolve antes do fluxo entrar em contato com os conversores, já que a direção da corrente não é controlada, sendo influenciada por fatores como o vento e circulação dirigida

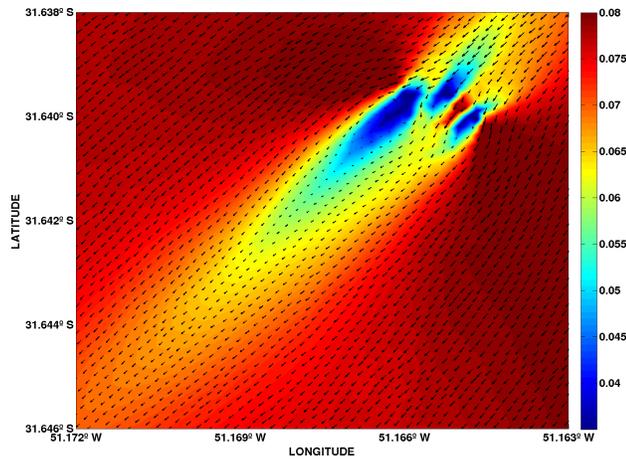


Figura 5: Sítio com mais 2 conversores implantados nas regiões com maior intensidade de corrente.

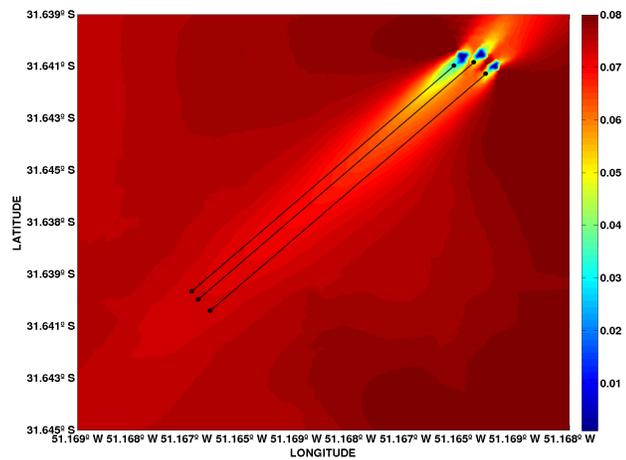


Figura 6: Linhas demonstrando a distância em que a esteira ainda influencia na intensidade da corrente, em torno de 400 m.

por gradientes de densidade na plataforma continental (Matano et al., 2010). Sendo assim é possível analisar que existem períodos durante a simulação, que esta corrente muda de direção e como o resultado apresentado mostra a média da intensidade durante o ano simulado é possível analisar uma esteira menor que também se apresenta antes do fluxo chegar aos conversores.

A Figura 7 mostra a intensidade das correntes em forma isolinhas. Nesta figura podem ser observados os locais com maior intensidade para que sejam implantados mais dois conversores no sítio. Neste resultado também é possível analisar a intensidade da esteira que se forma após o fluxo da corrente ultrapassar os conversores. O crescimento gradativo da intensidade das correntes ao se afastar dos conversores também pode ser observado neste resultado.

As Figuras 8 e 9, demonstram os vetores de velocidade e direção da corrente e a potencia média convertida pelo sítio nos dois cenários considerando 1 turbina e 3 turbinas. Através dos vetores de velocidade no sítio com 1 conversor, pode ser observado que a intensidade da corrente não sofre uma redução tão intensa ao passar pela turbina, conseguindo assim voltar a sua intensidade normal de forma mais rápida e à uma distância menor do que acontece com o sítio com 3 conversores. Por outro lado, neste cenário os vetores de velocidade mostram que a intensidade da corrente ao passar pelas turbinas tem uma redução bem maior, fazendo com que a sua velocidade chegue a quase ser nula por alguns momentos, de forma que tem que alcançar uma distância muito maior para voltar a velocidade normal.

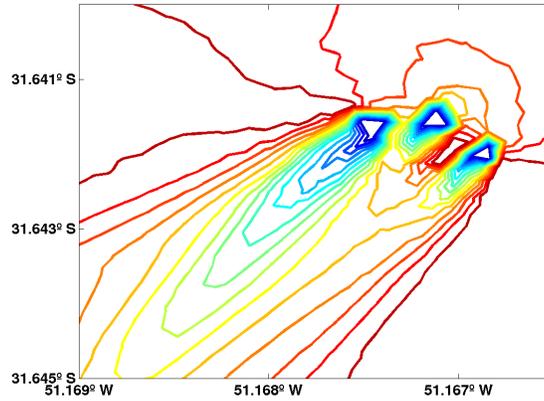


Figura 7: Área do estudo em Isolinhas, Linhas em azul representam onde o fluxo tem menor intensidade de corrente, enquanto as linhas em vermelho mostram onde a corrente tem maior média de intensidade.

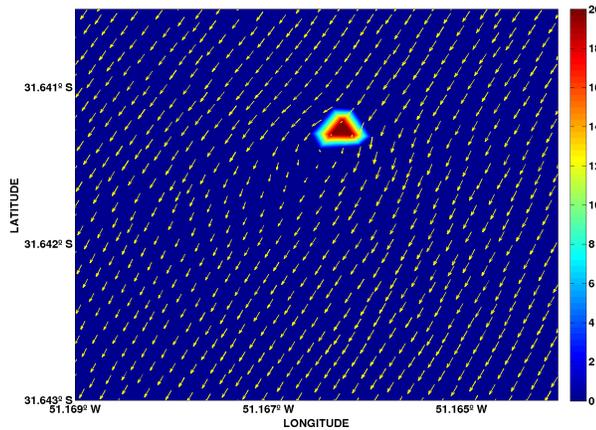


Figura 8: Sítio com 1 turbina em potencia máxima de conversão.

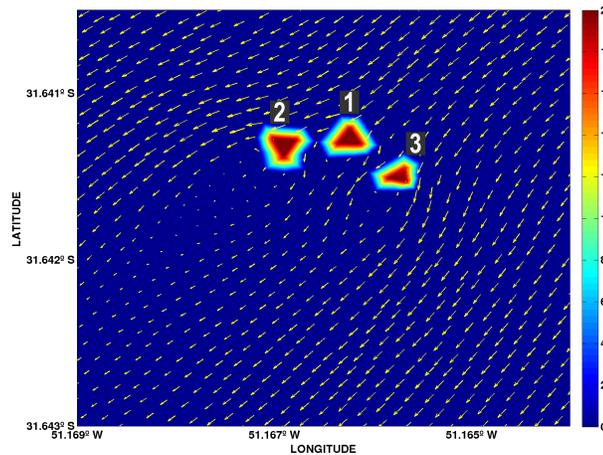


Figura 9: Sítio com mais dois conversores implantados nas áreas de maior intensidade de corrente.

Nos pontos definidos nas figuras foram obtidas séries temporais que mostram a potência convertida que ocorreu no sítio, também foi observado o comportamento dos conversores durante o período simulado sendo possível verificar que existem diferentes dias de máxima potência de conversão entre as turbinas, mas que na média todos os 3 conversores

trabalham de forma similar. É possível analisar que a turbina 1 tem seu pico de conversão entre os dias 230 e 240, enquanto a turbina 3 tem seu pico entre os dias 330 e 340, já a turbina 2 durante os dias simulados não teve um pico de máxima conversão, mesmo tendo sido implantada no local com maior intensidade de corrente. Figura 10

A Tabela 2, mostra os valores obtidos de conversão de energia durante o ano simulado. Nesta tabela pode ser observado o resultado em W (watts) que cada turbina converteu e o dado médio do sítio. Os valores obtidos foram calculados a partir dos dados extraídos a cada passo de tempo das séries temporais de cada turbinas, destes valores foram calculados a mínima, a média e o desvio padrão para cada turbina e para o sítio. Na tabela pode ser observado que tanto a turbina 1, quanto a turbina 3, tiveram uma média de conversão melhor do que a turbina 2, como observado através do resultado anterior (Figura 10). Isso mostra que aumento da intensidade do escoamento no entorno da turbina 1 faz com aja uma maior quantidade de movimento no entorno da mesma o que possibilitou um aumento de potência disponível na região da turbina 3. O que fez com que ela obtivesse uma potencia de conversão melhor.

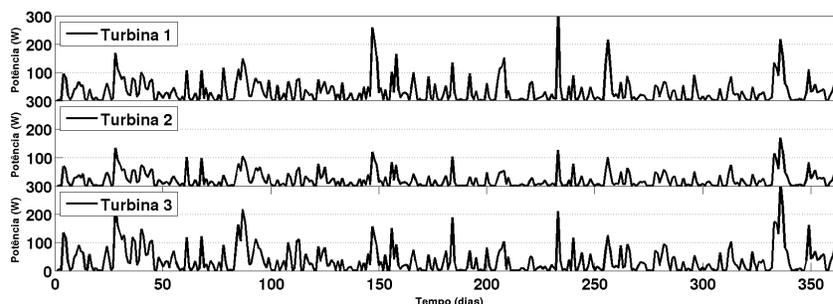


Figura 10: Série temporal dos 3 conversores em Watts no período simulado.

Tabela 2: Comparação entre a quantidade de energia convertida em cada uma das turbinas.

<i>Energia</i>	<i>Sítio</i>			
	Turbina 1	Turbina 2	Turbina 3	Média do Sítio
Mínima (W)	0	0	0	0
Média (W)	32,77	21,47	36,60	30,28
Desvio Padrão (W)	19,57	8,34	17,25	15,05

4. CONCLUSÕES

Durante o trabalho foi possível analisar que o local é adequado para a implantação de um sítio de conversores de energia elétrica utilizando as correntes oceânicas. Também foi possível observar que a configuração do sítio tendo como relação à intensidade da corrente vai se estendendo lateralmente e longitudinalmente na forma de um triângulo, tendo este padrão por consequência da direção da corrente e seu comportamento ao transpor os conversores. Esse resultado está de acordo com o definido na metodologia de Design Construtal, sendo que o sítio de conversores se comportou da forma esperada pela definição. Desta forma é possível observar que se implantarmos um conversor dentro da área de menor intensidade de corrente isso acarretará em uma perda de potência na turbina que está sendo instalada em comparação com o caso de uma turbina exposta a corrente livre (isoladamente). Também foi possível concluir que os conversores trabalham de forma uniforme sem ter diferenças muito grandes entre a quantidade de energia convertida entre eles, mesmo sendo implantados nos locais de maior intensidade de corrente.

5. REFERENCIAS

- Bejan, A. e Lorente, S., 2008. "Design with Constructal Theory". Wiley, Hoboken.
- Bejan, A. e Zane, P., 2012. "Design in Nature: How the Constructal Law Governs Evolution in Biology, Physics, Technology, and Social Organizations". , n° June.
- Braga, M.F. e Krusche, N., 2000. "Padrão de ventos em Rio Grande, RS, no período de 1992 a 1995". Atlântica, Vol 22, pp. 27–40.
- Costa, R.L. e Möller, O.O., 2011. "Estudo da estrutura e da variabilidade das correntes na área da plataforma interna ao largo de Rio Grande (RS, Brasil), no sudoeste do Atlântico Sul, durante a primavera-verão de 2006-2007 *". Vol 11, n° 3, pp. 273–281.

- Hervouet, J.M., 2007. “Compatibility between finite volumes and finite elements using solutions of shallow water equations for substance transport”. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*.
- Kirinus, E.P., Marques, W.C. e Stringari, C.E., 2012. “Viabilidade de conversão da energia de correntes marinhas na Plataforma Continental Sul do Brasil.” *Vetor*, Vol 22, pp. 83–103.
- Lu, N., Svennberg, U., Bensow, R. e Simulation, L.E., 2012. “Numerical Simulations of the Cavitating Flow on a Marine Propeller”. , n° Cav, pp. 978–981.
- Marques, W.C., Fernandes, E.H.L., Malcherek, A. e Rocha, L.A.O., 2012. “Energy converting structures in the Southern Brazilian Shelf: Energy Conversion and its influence on the hydrodynamic and orphodynamic processes”. *Journal of Geophysical Research*.
- Matano, R.P., Palma, E.D., Piola, A.R., Sciences, A., Blanca, B. e Aires, B., 2010. “The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the Southwestern Atlantic Shelf circulation”, pp. 983–995.
- Möller, O.O.J., Piola, A.R., Freitas, A.C. e Campos, E.J.D., 2008. “The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America”. *Continental Shelf Research*.
- Myers, L. e Bahaj, A.S., 2005. “Simulated electrical power potential harnessed by marine current turbine arrays in the Alderney Race”. Vol 30, pp. 1713–1731.
- Myers, L.E. e Bahaj, A.S., 2010. “Experimental analysis of the flow field around horizontal axis tidal turbines by use of scale mesh disk rotor simulators”. *Ocean Engineering*, Vol 37, n° 2-3, pp. 218–227.
- Pezzato, B.C., Kirinus, E.P. e Marques, W.C., 2015. “Estudo da hidrodinâmica de diferentes geometrias de sítios de conversão de energia das correntes”. Vol 11, pp. 1–8.
- Piola, A.R., Matano, R.P., Palma, E.D., Moller, O.O. e Campos, E.J., 2005. “The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf”. *Geophysical Research Letters*, Vol 32, pp. L01603.
- Piola, A.R., Romero, S.I. e Zajaczkovski, U., 2008. “Space-time variability of the Plata plume inferred from ocean color”. *Continental Shelf Research*, Vol 28, pp. 1556–1567.