VIABILIDADE DE CONVERSÃO DA ENERGIA DE CORRENTES MARINHAS NA PLATAFORMA CONTINENTAL SUL DO BRASIL

EDUARDO DE PAULA KIRINUS[1],CAIO EADI STRINGARI[2], WILIAM CORREA MARQUES[3]

RESUMO

Várias formas de conversão de energia foram desenvolvidas no decorrer dos anos, com destaque para os conversores de energia das correntes, que demonstram alta capacidade de geração energética e já se encontram em funcionamento em algumas regiões do mundo. A Plataforma Continental Sul do Brasil possui alta variabilidade espacial e temporal no regime de correntes costeiras, fato que dificulta a conversão unidirecional de energia. Neste sentido, para a conversão de energia das correntes, seria recomendado o uso de turbinas helicoidais que são capazes de gerar energia de forma multidirecional. A região de estudo demonstrou possuir duas regiões com ótimo potencial energético, onde na região mais viável a produção média de energia pode alcançar 40 MWh e ainda valores integrados de 13GWh/ano. Através da simulação de sítios de conversão nos locais de maior viabilidade, foi observado que o padrão da velocidade residual das correntes é predominantemente direcionado para sudoeste, devido à predominância de ventos de quadrante norte, sendo o sítio mais energético capaz de gerar 274 GWh durante os 280 dias de simulação. Foi observado que os ciclos de maior geração energética ocorrem com periodicidade de 16 dias demonstrando alta correlação com eventos associados à passagem de frentes meteorológicas na região.

PALAVRAS-CHAVES: Correntes costeiras. Potencial energético. TELEMAC3D. Método de elementos finitos.

VIABILITY OF THE ENERGY CONVERSION FROM MARINE CURRENTS INTO THE SOUTH BRAZILIAN SHELF

ABSTRACT

Several methods of energy conversion have been developed over the years, especially the current energy converter turbine-based, which demonstrate high energy generation capacity and that have already been in operation. The Southern Brazilian Shelf presents high synoptic and seasonal variability of coastal current systems, which hinder the unidirectional conversion of energy. Hence, it is recommended to use helical turbines which are capable of generating energy in a multidirectional way. The studied area has shown two regions with high potential for exploitation of energy from marine currents, in which the region more viable can reach an average production around 40 MWh and integrated values of 13GWh/year. Through the site of conversion simulations on the more viable spots, it was observed that the pattern of the residual currents is mainly directed

[1] Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Oc. Eduardo de Paula Kirinus ekirinus@gmail.com

[2] Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Acadêmico Caio Eadi Stringari, caiodalaqua@hotmail.com

[3] Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Instituto de Matemática, Estatística e Física. Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Prof. Dr. Wiliam Correa Marques, wilian_marques@yahoo.com.br

through southeast, due to the predominance of wind from the northern quadrant, being the most energetic sites capable of producing 274 GWh during the 280 days of simulation. It was also observed that the highest levels of power generation were found at intervals of 16 days, showing high correlation with events associated with the passage of meteorological fronts along the study region.

KEYWORDS: Coastal currents. Energy potential. TELEMAC3D. Finite element method.

1. INTRODUÇÃO

Os oceanos são uma importante e inesgotável fonte de energia renovável [1]. Esta energia pode ser captada de duas formas: através da energia potencial (devido a variações no nível do mar) ou da energia cinética, que consiste em aproveitar essencialmente a energia das correntes e das massas de água associadas. A técnica utilizada, de uma forma geral, pode ser definida como eólica submarina, tendo aproximadamente os mesmos princípios de funcionamento e somente diferindo o fluido com a qual interagem. De acordo com Khan et al [2], a energia dos fluxos de rios e estuários, correntes de marés e outros canais de água artificiais podem ser considerados como uma fonte viável de energia renovável.

O Centro Canadense de Hidrologia (CHC) realizou um mapeamento energético dos recursos marinhos da região costeira Canadense [3]. Neste estudo foi verificado que a potência elétrica média nos 190 pontos analisados equivaleria a aproximadamente 63% da demanda de energia Canadense. Um estudo similar foi realizado por [4] nos Estados Unidos, onde os autores identificaram as regiões com os maiores potenciais para a utilização de hidroenergia. Defne [5] investigou o potencial energético das ondas e correntes de maré na costa sudeste dos Estados Unidos, onde verificou um possível potencial de conversão da energia das marés de 8kW/h utilizando uma turbina de 5m de diâmetro instalada no rio Altamaha, podendo gerar uma potência integrada anual de 71MW/Ano.

No Brasil, Marques et al. [6] realizaram estudos sobre a influência da instalação de turbinas hidrocinéticas na Plataforma Continental do Sul do Brasil, 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.

A Plataforma Continental Sul do Brasil (PCSB), localizada entre 28 ºS e 35 ºS (Figura 1) apresenta uma linha de costa pouco acidentada, com orientação Nordeste - Sudoeste. A batimetria dessa região é bastante suave, com maior declividade e quebra de

plataforma localizada por volta da isóbata de 180m [7]. Nesta região, a descarga fluvial da Lagoa dos Patos se destaca como uma importante contribuição continental.

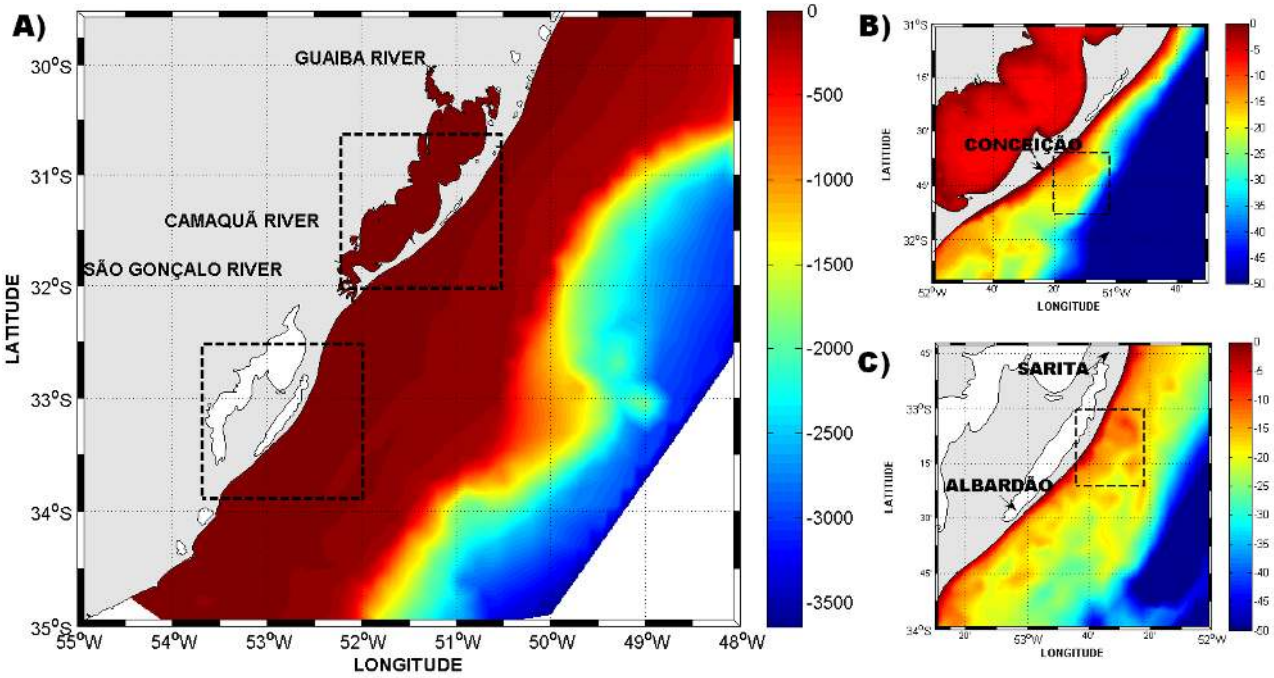


Figura 1. (a) A plataforma continental do Sul do Brasil, a Lagoa dos Patos e seus principais rios afluentes (Rio Guaíba, Camaquã e São Gonçalo). (b) Destaque na região ao norte do farol da Conceição, (c) e na região entre os faróis do Sarita e do Albardão. Profundidade dada em metros.

A Lagoa dos Patos possui uma extensa bacia de drenagem com aproximadamente 201.626 km. Os mais importantes afluentes são os rios Jacuí e Taquari, de forma que seu fluxo de água doce chega à Lagoa dos Patos através do Rio Guaíba. Os máximos de descarga ocorrem normalmente do fim do outono ao início da primavera, e a média anual de descarga dos principais afluentes é de aproximadamente 2000 m³/s [6].

O Oceano Atlântico Sudoeste é uma das regiões mais dinâmicas do oceano global [8,9], sendo caracterizada por grandes contrastes termohalinos e intensa atividade de mesoescala [10]. Isso ocorre devido as diversas massas d'água encontradas na região [11] que geram alta variabilidade espacial e temporal [12], devido a Confluência Brasil-Malvinas.

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. Sua circulação é influenciada principalmente pelas águas da pluma do Rio da Prata, pelos ventos e pela intensidade das correntes de contorno oeste que fluem pela quebra de

plataforma [13], onde existe uma grande variação dos parâmetros físicos devido a sazonalidade.

A alta variabilidade sazonal e interanual, no campo de vento [14, 15], gera ventos de nordeste (NE) dominantes no verão, que forçam um deslocamento das águas costeiras para o Sul e ventos de sudoeste (SO) presentes no inverno que geram um deslocamento para Norte [6,16-18]. Estas situações podem ser intensificadas de acordo com a intensidade do índice de Oscilação Sul El Niño [14].

O balanço energético do Rio Grande do sul [19], menciona brevemente a energia das correntes marinhas como possível fonte de energia, entretanto, maior importância deve ser dada para esta fonte acessível de energia, que pode facilmente auxiliar a matriz energética brasileira. Neste sentido, o principal objetivo deste trabalho é estudar - através de um modelo tridimensional de circulação oceânica - a viabilidade de utilização dos conversores de energia das correntes marinhas na Plataforma Continental Sul do Brasil, simulando sítios de conversão nos locais mais viáveis, de forma a avaliar o potencial energético de cada região.

2. METODOLOGIA

Na realização deste estudo foi utilizada uma simulação numérica de dois anos (280 dias), compreendendo o ano de 1998 e de 1999, através da utilização do modelo numérico tridimensional TELEMAC3D acoplado com o módulo de conversão de energia elétrica [6], de forma a investigar a viabilidade de conversão de energia de correntes em energia elétrica pela utilização de conversores hidrocinéticos na forma de turbinas.

2.1. Modelo Numérico

O modelo numérico TELEMAC3D (Laboratoire National d' Hydraulique et Environnement of the Company Eletrecité de France - EDF) é um módulo do sistema de modelagem TELEMAC que utiliza o método de discretização espacial em elementos finitos. Esse modelo resolve as equações de Navier-Stokes, para a discretização espacial, utilizando o sistema de coordenadas sigma para a discretização vertical, de forma a acompanhar os limites superficiais e de fundo. O modelo TELEMAC3D resolve as equações de Navier-Stokes considerando a variação local na superfície livre do mar, ignorando variações de densidade na equação da conservação da massa, e considerando a pressão hidrostática e as aproximações de Boussinesq para resolver as equações do movimento.

2.2. Módulo da Conversão de Energia

A energia das correntes oceânicas pode ser transformada utilizando conversores com tecnologia semelhante à utilizada em conversores eólicos através de um rotor submerso que é forçado a girar pelo fluído ao seu redor. Segundo Khan et al [2], em estudo recente sobre equipamentos existentes para a captação de energia hidrocinética, ao todo foram encontrados 76 equipamentos, dentre eles, turbinas em funcionamento ou ainda em fases iniciais de pesquisa.

As simulações hidrodinâmicas utilizadas neste trabalho foram realizadas com o modelo TELEMAC3D, enquanto as investigações associadas à conversão de energia das correntes em energia elétrica foram realizadas com o módulo da energia desenvolvido por Marques et al. [6]. Este módulo utiliza a equação padrão de turbinas (Equação 1) para o cálculo do potência elétrica (*P*) convertida em watts (*W*), a qual é proporcional à área de seção transversal da turbina e ao cubo da intensidade da velocidade de corrente incidente.

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

Onde: η é o coeficiente de eficiência da turbina; ρ é a densidade da água; A corresponde à área da secção transversal do conversor; e v representa a intensidade da velocidade de corrente incidente. Baseado no princípio da conservação de energia, durante cada passo de tempo do modelo hidrodinâmico (FIGURA 2), a velocidade de corrente é calculada e transferida para o módulo de conversão de energia, que converte parte da energia das correntes em energia elétrica através da equação da potência elétrica (Equação 1). No módulo de conversão de energia, a velocidade das correntes é atualizada para manter o balanço de energia do modelo TELEMAC3D.



Figura 2. Fluxograma da interação entre o modelo TELEMAC3D e o módulo da energia (Adaptado de Marques et al. [6]).

Apesar de conversores axiais [20] apresentarem melhor desempenho em fluxos constritos ou em correntes de marés, neste trabalho será utilizado o conversor helicoidal de Gorlov [21], devido a vantagem de captar energia de forma multidirecional, fato que facilita a sua implementação matemática e numérica. É importante ressaltar também que a região segundo Möller et al. [13], Marques et al. [6,16-18], dentre outros, possui um padrão de circulação altamente dinâmico e multidirecional, sendo controlado em escala temporal de dias a semanas pela passagem de sistemas meteorológicos frontais.

Portanto a turbina helicoidal apresenta uma área frontal retangular (*h*D*) e seu coeficiente de eficiência (η) é igual a 0.35, segundo Gorlov [21]. Neste sentido consideramos que a Equação 2, representa a potência elétrica convertida através da utilização de um conversor helicoidal.

$$P(W) = \frac{1}{2}\eta\rho(h*D)v^3 \qquad (2)$$

2.3. Condições iniciais e de Contorno

O modelo numérico foi inicializado do repouso, com campos de salinidade e temperatura realísticos e elevação de níveis constantes. Os campos de salinidade e temperatura utilizados como condições iniciais foram obtidos do projeto *Ocean Circulation and Climate Advanced Modeling Project* (OCCAM) e um nível de água de 0.75 m, valor aproximado da média de maré na região [22], foi utilizado como padrão.

As condições de contorno líquidas utilizadas neste trabalho são consideradas como as fronteiras continentais do Rio Guaíba, do Rio Camaquã e do Canal São Gonçalo, onde são prescritas séries temporais de descarga fluvial. Estes dados foram adquiridos através da página virtual da Agência Nacional das águas (ANA). Os dados de descarga do canal São Gonçalo foram considerados constantes em 760 m^3/s segundo Viegas e Franz [23].

Na fronteira oceânica foram prescritos: a influência da maré astronômica, a variação do nível do mar relativo ao efeito do vento e a velocidade das correntes, além de campos de salinidade e temperatura de forma a perfazer o padrão de circulação oceânica de meso-escala. Os campos de salinidade e temperatura, velocidade de correntes e de variações de nível associados à influência dos ventos que foram utilizados como condições de contorno, foram obtidas do modelo global OCCAM. Enquanto a influência das marés foi considerada através da prescrição de dados de amplitude e fase, calculadas pelo Grenoble Model FES95.2 (Finite Element Solution v. 95.6).

Nas condições de contorno superficiais, foram prescritas as variações espaciais do vento e temperatura do ar, que foram adquiridos junto a *National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA)*. Os dados de temperatura do ar junto à superfície do oceano foram utilizados, de forma a considerar os processos de troca de calor com a atmosfera.

2.4. Calibração e Validação

Monteiro et al. [24] e Fernandes et al. [25,26] apresentaram resultados de calibração e validação do modelo para o estuário da Lagoa dos Patos nas versões bidimensional e tridimensional. Posteriormente, Marques et al. [6,16-18] realizaram um conjunto de simulações para a calibração e validação do modelo TELEMAC3D na região de estudo que abrange a Lagoa dos Patos e zona costeira adjacente. Os resultados destes testes de calibração e validação indicaram que o modelo TELEMAC3D pode ser utilizado para estudos na Plataforma Continental do Sul do Brasil com um grau de precisão aceitável. Como resultados dos estudos destes autores, valores de uma série de coeficientes físicos (como por exemplo, coeficiente de influência do vento, coeficiente de fricção de fundo e modelos de turbulência) foram utilizados para a realização deste estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

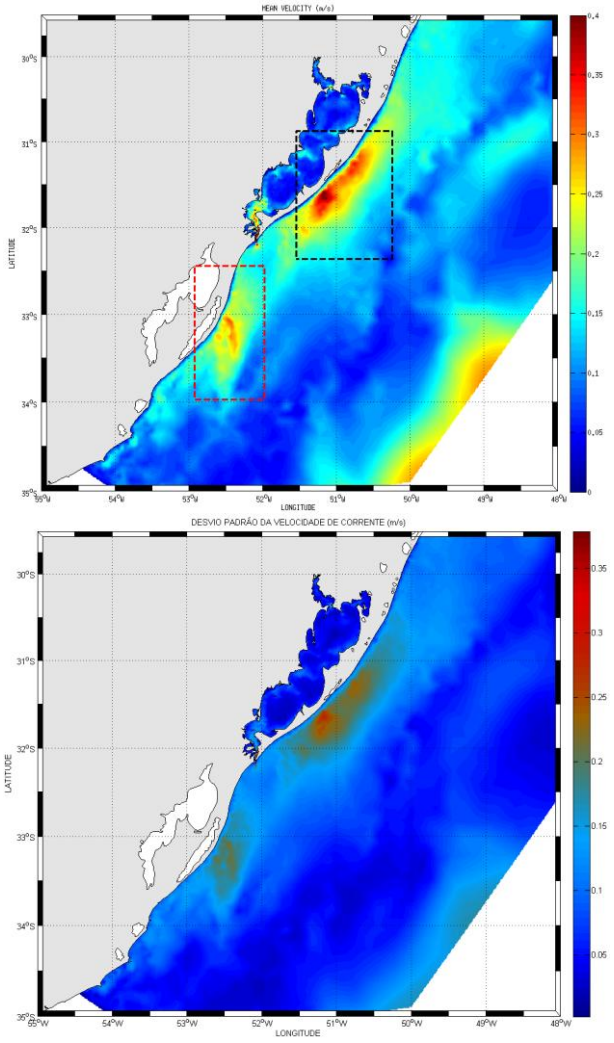
3.1. Viabilidade da Instalação na Plataforma Continental Sul do Brasil

Devido às condições hidrodinâmicas da região, caracterizadas pelo encontro de diferentes massas de água [27], seria necessário a utilização de uma turbina que convertesse energia das correntes em energia elétrica de forma multidirecional [2]. Neste caso, a turbina de hélice helicoidal [21] seria mais adequada, pois esta turbina é capaz de gerar rotações unidirecionais independentes da direção da corrente que atinge a área de absorção [28].

Os possíveis locais para instalação de turbinas estão em destaque na FIGURA 1. Estes locais serão referenciados nas próximas seções como *região norte* - compreendida entre Solidão e ao sul do Farol da Conceição - e *região sul*, espacialmente definido desde o Sarita, ao norte, e ao sul do Albardão.

Nestas regiões a velocidade média de corrente (FIGURA 3a) foi analisada, sendo possível observar valores médios alcançando máximos de 0,4 m/s nas duas regiões em destaque. Entretanto, este valor médio está associado a uma variabilidade, e desta forma o desvio padrão da velocidade de corrente (FIGURA 3b) está distribuído pelas mesmas regiões de altos valores médios (FIGURA 3a). Este resultado sugere 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, visto que o desvio padrão da velocidade apresenta um valor próximo à média.

Na região norte (FIGURA 4), onde as isóbatas são mais próximas, e apresentam um gradiente vertical mais intenso, é possível observar valores energia média (FIGURA 4a) em torno de 25 MWh, enquanto que na região em que as isóbatas estão mais afastadas (isóbata de 20 m), percebemos uma intensificação da energia média para 40 MWh.



(a) **(b)**

Figura 3: (a) Velocidade média de corrente (m/s) e seu desvio padrão (b) durante todo o período de simulação. Em destaque as regiões de maior velocidade média de corrente.

Esta região se caracteriza por ter topografia complexa, apresentando a isóbata de 50 m (limite da plataforma continental interna) mais próxima da linha de costa, onde possui um gradiente vertical elevado. Em direção ao Farol da Conceição, onde esta isóbata se afasta da costa, o gradiente vertical é reduzido. Sendo assim, o padrão de circulação é alterado quando a corrente passa de uma região com as isóbatas de 50 m próximo a costa, onde o fluxo costeiro é mais intenso e concentrado, e encontra uma região mais rasa em torno de 20 m.

Quando este processo ocorre, o fluxo tem sua intensidade reduzida e se espalha, entretanto, na região norte, além de ocorrer esta redução, também ocorre uma intensificação quando a corrente junto a isóbata de 20 m encontra um estrangulamento topográfico, desviando a corrente para a isóbata de 30 m e aumentando sua velocidade.

A região sul (FIGURA 5), apresenta um padrão distinto de batimetria, onde as isóbatas estão mais afastadas, entretanto o relevo submarino apresenta grandes irregularidades. É possível observar altos valores de energia média (FIGURA 5a) por quase toda a extensão da plataforma

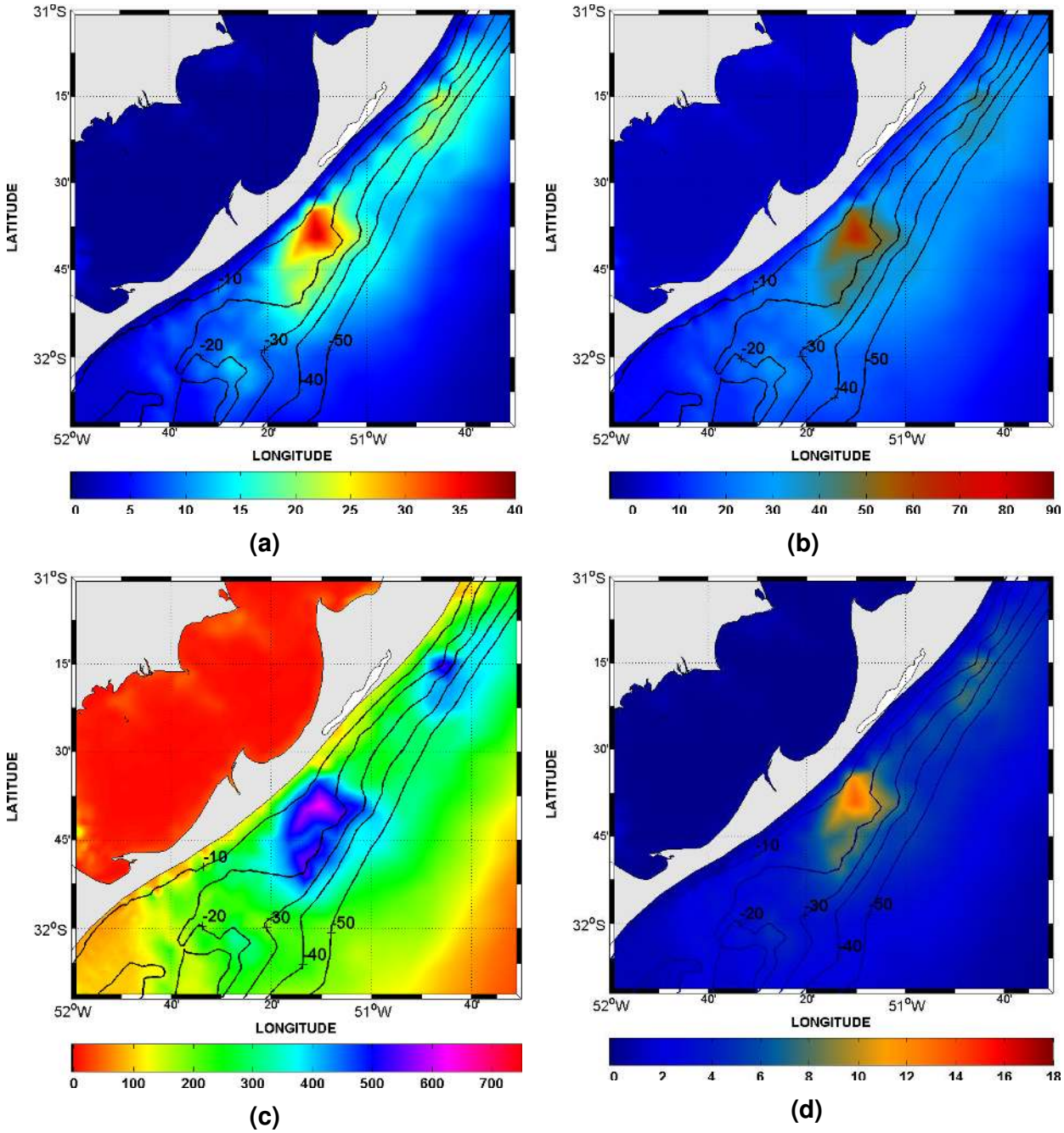
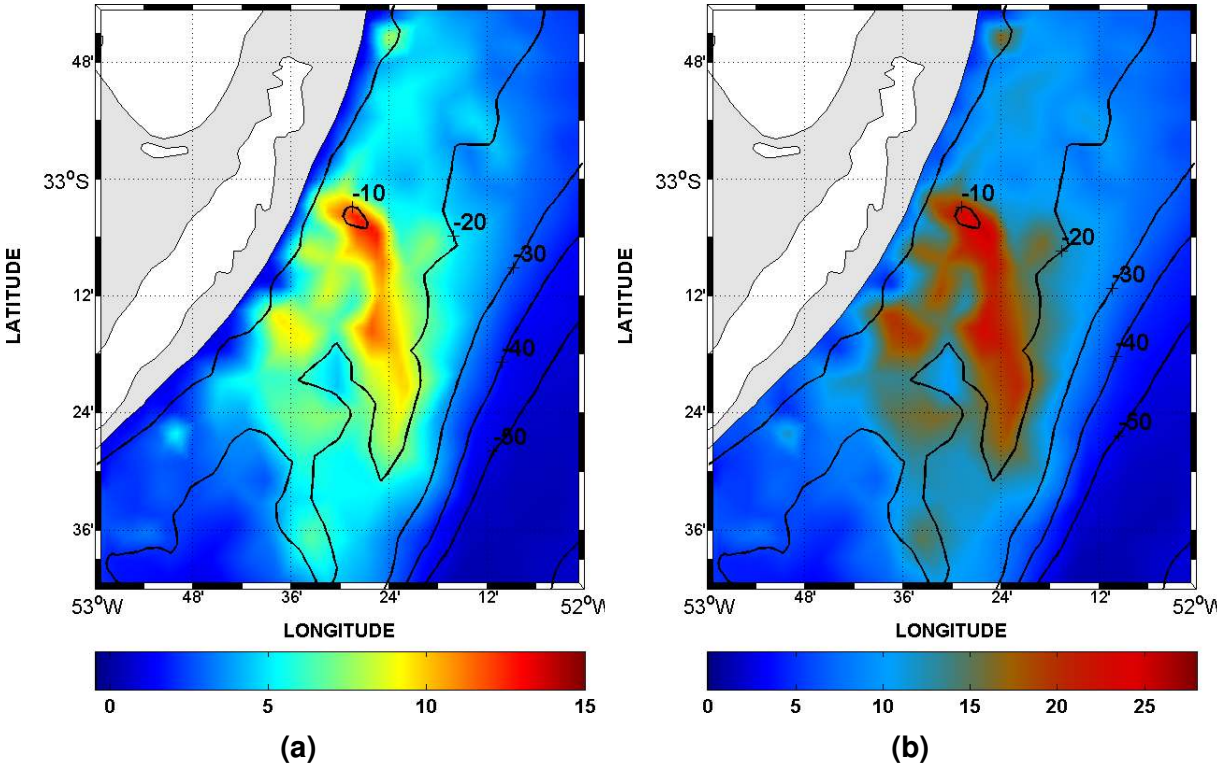


Figura 4: Análise da energia para a região de interesse ao norte. (a) Energia média (MWh); (b) Desvio padrão da energia (MWh); (c) Energia máxima (MWh); (d) Energia integrada (GWh/Ano). A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.

continental interna entre as isóbatas de 10 m e 20 m de profundidade. Nesta região, valores de energia média em torno de 15 MWh são observados.

Nas mesmas regiões são observados os picos máximos de energia (FIGURA 5c), alcançando cerca de 300 MWh. Enquanto que, para o desvio padrão (FIGURA 5b) nesta região, são observados valores superiores à média, em torno de 27 MWh. A energia integrada (FIGURA 5d) da região sul pode alcançar valores em torno de 5 GWh/Ano, apesar de possuir menor potencial energético do que a região norte, a região sul também representa um potencial considerável para a conversão de energia das correntes.



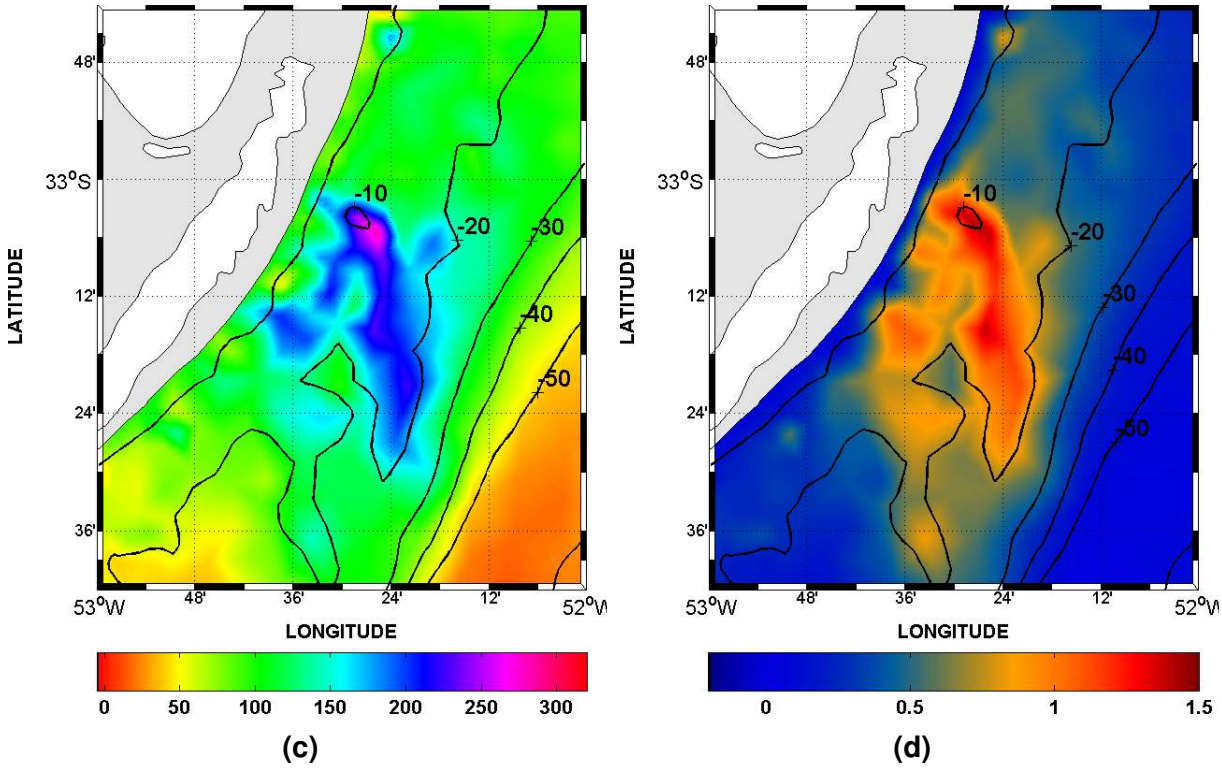


Figura 5: Análise da energia para a região de interesse ao sul. (a) Energia média (MWh); (b) Energia integrada (GWh/Ano). (c) Energia máxima (MWh); (d) Energia integrada (GWh/Ano). A linha batimétrica encontra-se com valores definidos variando de 0 a -50m de profundidade.

A região sul apresenta batimetria complexa com expressiva presença de bancos lineares, como o Banco do Albardão, e apresentando também uma grande depressão, o "Poço do Albardão" com 75 m de profundidade. Nesta região, a corrente costeira dirigida pela isóbata de 20 m encontra o Banco do Albardão como barreira, o fluxo sofre divergência e consequente intensificação em seu meandramento, sugerindo que a intensificação da geração energética nesta região pode ser fortemente induzida pela topografia irregular de fundo.

3.2. Simulação de Sítios de Conversão nos Locais de Maior Viabilidade

Uma das vantagens da metodologia de simular cenários de sítios de conversão está em permitir a criação de eventos que são capazes de ocorrer. Desta forma, estes cenários podem ser estudados de forma a otimizar a posição dos conversores ou sua estrutura física. Esta pesquisa não tem o foco de identificar estes tipos de eventos, mas prover

informações para facilitar e auxiliar no desenvolvimento de estratégias para uma gama de situações e fatores em futuros estudos.

Para a realização da análise dos sítios de conversão, a metodologia de Marques et al. [6] foi utilizada com o objetivo de verificar a conversão de energia em um sítio de conversores, sendo que também foi considerado o efeito físico da presença do conversor. De forma a simular as alterações da circulação local, o efeito físico da forma dos conversores foi considerada através da utilização de conversores com uma estrutura aproximada ao formato de um poste retangular, colocados no fundo e alcançando a superfície das regiões de maior viabilidade energética (FIGURA 6).

Nas regiões norte e sul, foram criados os sítios de conversores contendo 10 conversores helicoidais em cada região. Os conversores estão alinhados com a linha de costa e distam entre si 200 m em todas as direções (FIGURA 6), de forma a obedecer à distância adequada para evitar o "efeito esteira", decorrente da turbulência gerada pela estrutura [30]. Esta distância varia de acordo com a velocidade do fluxo incidente, pois de acordo com Myers e Bahaj [30] o efeito turbulento lateral pode alcançar até 3 diâmetros de distância do conversor, enquanto que a turbulência frontal pode variar de 6 a 10 diâmetros [31].

De acordo com Li e Calisal [32], a relação entre a altura e o raio (H/R) do gerador, gera influências no coeficiente de potência da turbina, onde valores altos da relação H/R podem gerar altos valores do coeficiente de potência da turbina. Desta forma, utilizando a relação de Li e Calisal [32], podemos obter o mesmo coeficiente de potência de Gorlov (η = 0,35), através de uma relação H/R = 1. Sendo assim, foi adotado para ambas as regiões de estudo H=14m e R=10m, sendo cada conversor capaz de fornecer 170 KW de potência nominal.

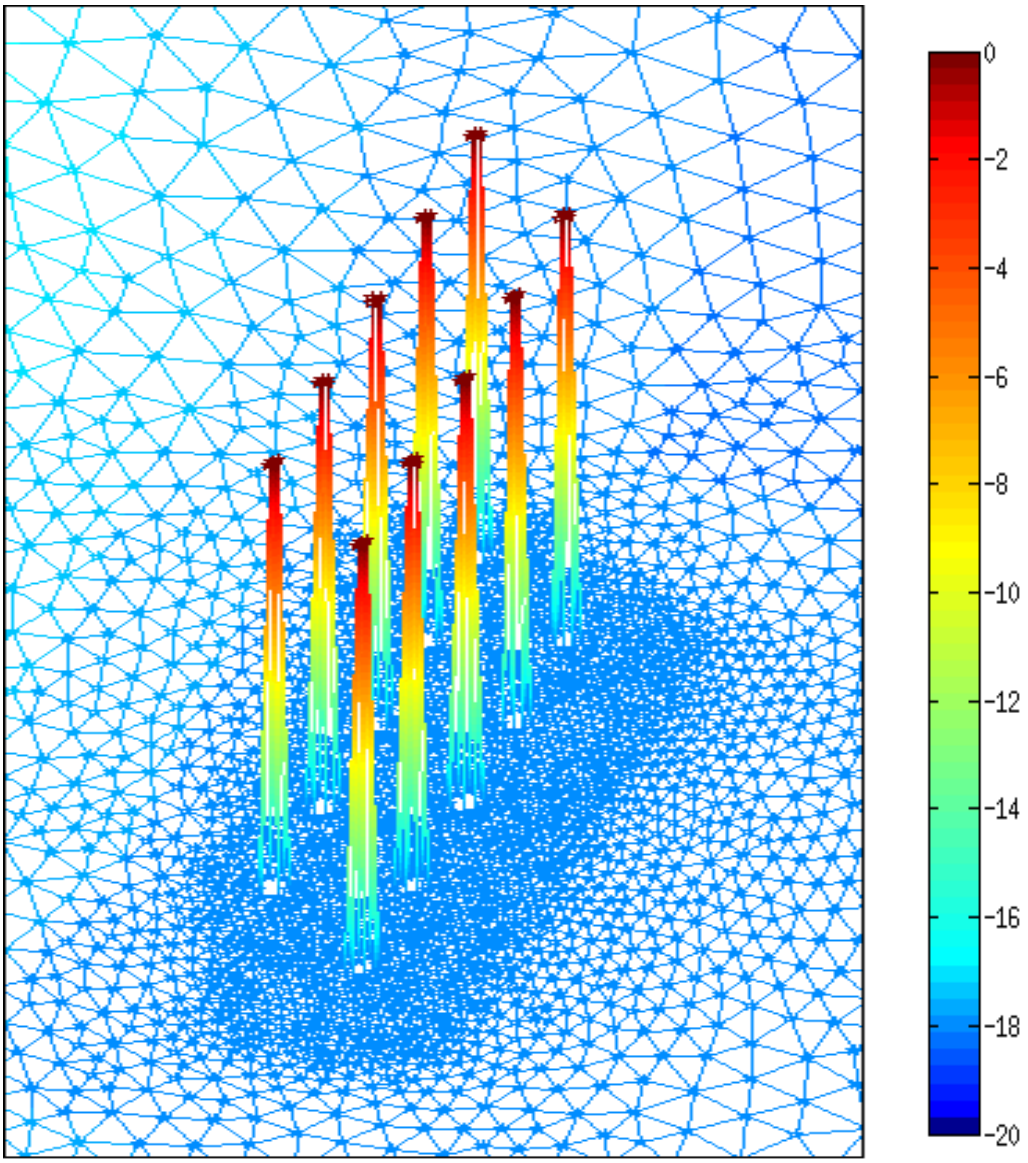


Figura 6. Sítio de conversão de energia com a malha tridimensional utilizada nas simulações.

Durante os 280 dias de simulação foi observado que a intensidade das correntes controla os picos de energia nos conversores. Em certos momentos, onde ocorre à redução da velocidade das correntes com valores abaixo de 0.15 m/s, ocorrem períodos de baixa geração energética. Podemos observar na TABELA 2 que o sítio de conversão na região norte demonstrou ter mais capacidade de geração energética do que a região sul corroborando o que foi observado na seção anterior.

Podemos observar, para a região norte, que a média dos dez conversores produz cerca de 4,0 MWh, o valor máximo de conversão do sítio foi de 227,9 MWh, e durante toda a simulação as dez turbinas geraram 274,3 GWh de forma integrada. Na Região sul foram

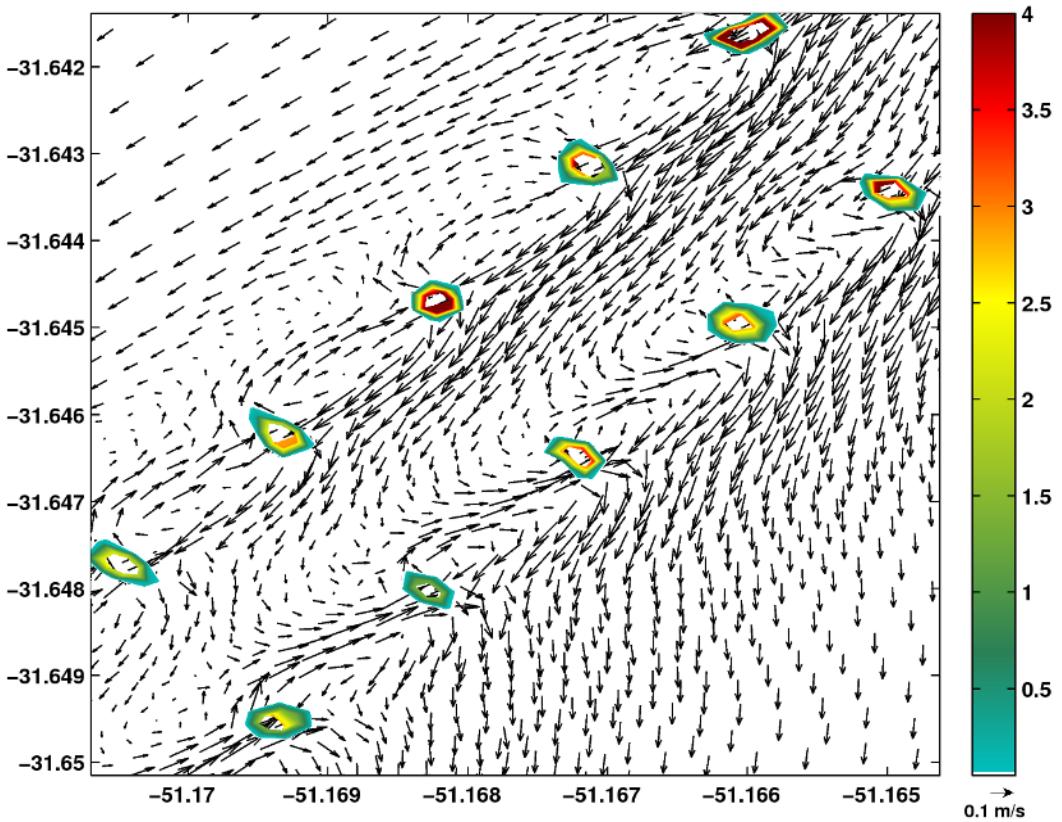
observadas taxas inferiores de geração energética, com média de 1,2 MWh, enquanto que o máximo de geração energética do sítio foi de 57,4 MWh, e durante todo o período da simulação os conversores da região sul geraram 81,3 GWh de forma integrada.

Bahaj e Myers [33] estudaram um sítio de conversão contendo 94 conversores de diferentes tamanhos em Alderney Race (Reino Unido), cuja potência nominal total do sítio é de 376 MW, alcançando valores integrados de energia de 7,4 TWh ao ano, equivalente a 2% da necessidade energética do Reino Unido para o ano de 2000. Considerando o sítio de conversão da região norte, cuja potência nominal total é de 1.7 MW, e sua capacidade anual de produção de energia é de 274,3 GWh, o que equivale a 1% do consumo energético do estado do Rio Grande do Sul no ano de 2010 (26,5 TWh) de acordo com Capeletto e Moura [19].

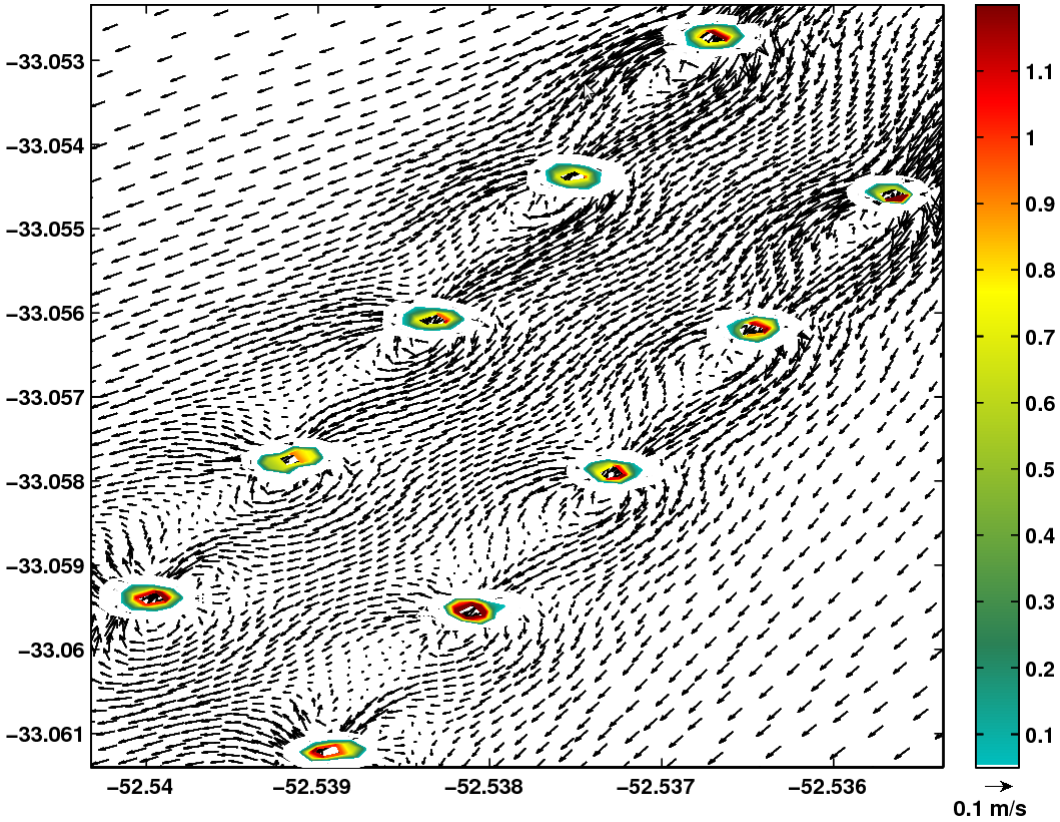
Tabela 2: Média temporal, valor máximo e valor integrado da energia elétrica gerada pelos 10 conversores durante os 280 dias de simulação.

Região	Média (MWh)	Máximo (MWh)	Integrado (GWh/280 dias)
Norte	4,0	227,9	274,3
Sul	1,2	57,4	81,3

O comportamento médio da geração de energia nos sítios de conversão pode ser analisado considerando o campo residual de velocidade de correntes sobreposto ao padrão do campo de energia elétrica média convertida (apresentado na forma de isolinhas de potência) (FIGURAS 7a e 7b). Podemos observar que ambas as regiões apresentam um padrão residual de velocidade de correntes direcionadas para sudoeste, que pode ser explicado pela dominância de ventos de quadrante norte na região de estudo ao longo do período analisado



(a)



(b)

Figura 7: Velocidades residuais da corrente e a energia média gerada pelos conversores (MWh) para a região norte (a) e sul (b).

.

Podemos observar que os conversores menos protegidos com relação ao campo residual de correntes conseguem manter um padrão de conversão de energia com maiores médias. É importante ressaltar que a região norte é capaz de gerar quase 4 vezes mais energia do que a região sul (FIGURA 7), resultado que corrobora os resultados obtidos na seção anterior, onde podemos verificar que a região sul apresenta um padrão médio de correntes com menores intensidades, apesar de mostrar menor desvio com relação às médias.

O espectro energético convertido foi analisado pela utilização da análise da técnica de ondaletas. As ondaletas são funções capazes de decompor e descrever outras funções no domínio da frequência de forma que podemos analisar estas funções em diferentes escalas de frequência (e de tempo) simultaneamente.

As análises foram aplicadas aos dados usando adaptações do método de ondaletas descritos por Torrence e Compo [34] e Morettin [35]. Para a análise de correlação foram extraídas séries temporais da energia elétrica e da intensidade da velocidade de corrente nos pontos ao redor dos conversores

Para a região norte, a série temporal da energia integrada para o sítio de conversão (FIGURA 8a) está cruzada com a série temporal da intensidade de correntes representativa para a região do sítio. Estas séries apresentam correlação direta entre os parâmetros, ao passo que a intensidade da corrente aumenta, a energia gerada se intensifica, entretanto, quando as intensidades da velocidade de corrente se apresentam muito abaixo de 1 m/s, os valores da energia se reduzem drasticamente. Para a região sul, a série temporal da energia apresenta o mesmo padrão de correlação direta entre as altas intensidades da corrente e alta conversão de energia, portanto este resultado não foi apresentado neste trabalho.

O espectro de energia local (FIGURA 8b) sugere o mesmo padrão de correlação, onde percebemos que os processos físicos que dominam a alta geração de energia possuem intervalos menores que 16 dias.

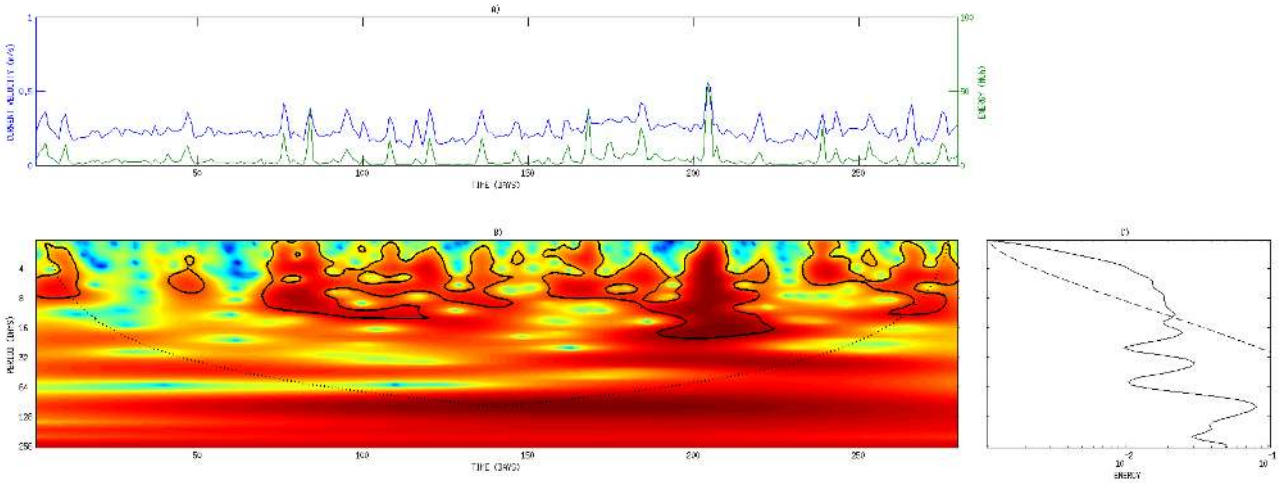


Figura 8: Análise da ondaleta para a região norte. (a) Série temporal cruzada da intensidade da velocidade de corrente (m/s) e da energia (MWh) utilizados para a análise de ondaleta. (b) Espectro cruzado de energia local. (c) Espectro cruzado de energia global. Na Ondaleta de Morlet a linha pontilhada indica o nível de 95% de confiança.

Percebemos que os processos físicos que dominam altos valores de energia ocorrem em escalas temporais menores do que 16 dias podendo se prolongar em certos momentos. O espectro global de energia (FIGURA 8c) corrobora esta análise, fortalecendo esta afirmativa, indicando com 95% de confiança a ocorrência de processos com estas escalas temporais durante todo o período de estudo. Este padrão é similar ao obtido por Marques et al. [6] no que diz respeito à ocorrência de processos e os ciclos de ocorrência. Desta forma, existe uma baixa sazonalidade associada aos eventos de geração energética, isso se deve a processos associados ao padrão de circulação das correntes costeiras, que são fortemente influenciados pela passagem de sistemas meteorológicos e alterações na intensidade e direção do vento [6,16-18].

4. CONCLUSÕES

Na Plataforma Continental Sul do Brasil foi encontrado duas regiões adequadas para instalação dos conversores de energia de correntes. Devido às características das velocidades de corrente caracterizadas pelo encontro de massas de água na região de estudo, é necessário a utilização de uma turbina que tenha a capacidade de converter energia das correntes de forma multidirecional, sendo a mais indicada neste caso, a turbina de hélice helicoidal.

A região ao norte se destaca com o maior potencial energético, podendo um único conversor gerar em média 40 MWh, atingindo uma taxa de conversão de energia integrada

de 13 GWh/Ano. A região sul possui moderado potencial energético, gerando em média 15 MWh e valores integrados de até 5 GWh/Ano. Para a região sul a capacidade de produção energética é inferior a da região norte, entretanto, possui alta estabilidade para a conversão de energia, por apresentar menores desvios com relação às médias e pequenas variações sazonais.

Foi possível observar que as regiões de maior produção energética estão associadas às regiões de intensas variações topográficas, pois a circulação costeira é altamente induzida pelas variações da batimetria nas proximidades da zona costeira, ocasionando alterações no padrão de circulação existente e consequentemente aumentando a geração de energia.

A ocorrência de eventos com escalas temporais menores que 16 dias ocasionam condições de alta geração energética durante todo o período de estudo. Estes eventos podem estar associados à passagem de sistemas meteorológicos, os quais promovem alterações na intensidade e direção do vento e controlam a circulação das correntes na região da plataforma continental interna do Rio Grande do Sul. Estas condições acarretam geração de mais energia proporcionalmente às maiores velocidades de corrente incidentes nos conversores.

O sítio de conversão da região norte, tem capacidade anual de produção de energia de 274,3 GWh, o que equivale a 1% do consumo energético do estado do Rio Grande do Sul no ano de 2010 (26,5 TWh). Neste sentido, é importante ressaltar que a descentralização das fontes de geração energética, além da, inesgotabilidade da energia das correntes marinhas qualifica esta fonte como um possível incremento na matriz energética brasileira. Em estudos futuros pretendemos aumentar o potencial energético dos sítios de conversores com a implementação matemática e numérica de difusores, podendo aumentar em até 10% a geração de energia, fato que permitirá o estudo dos efeitos estruturais da cavitação nos conversores de forma a evitar danos estruturais.

REFERÊNCIAS

[1] CRUZ, J. M. B. P.; SARMENTO A. J. N. A. Sea state characterization of the test site of an offshore wave energy plant. **Ocean Engineering**, n. 24, p. 763–775, 2007.

[2] KHAN, M.; BHUYAN G.; IQBAL M.; QUAICOE J. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. **Applied Energy**, v. 86, p. 1823–1835, 2009.

[3] CORNETT, A. **Inventory of Canada' s marine renewable energy resources**., tech. rep., Canadian Hydraulics Center. CHC-TR-041., 2006.

[4] HALL, D.G.; REEVES, K.S., BRIZZEE, SOMMERS, G.L. **Feasibility assessment of the water energy resources of the United States for new low power and small hydro classes of hydroelectric plants.**," tech. rep., U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Wind and Hydropower Technologies Program, Idaho Operations Office, 2006.

[5] DEFNE Z. **Multi-Criteria assessment of wave and tidal power along the Atlantic coast of the southeastern USA**. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 2010.

[6] MARQUES, W.C.; FERNANDES, E.H.L.; MALCHEREK A.; 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.

[7] ZEMBRUSCKI, S. **Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes**. tech. rep., Projeto REMAC, Rio de Janeiro, 1979.

[8] CHELTON, D.B.; SCHLAX M.G.; WITTER D.L.; RICHMANN J.;G. GEOSAT altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p. 877– 903, 1990.

[9] PIOLA, A.R.; MATANO R.P. **Brazil and Falklands (Malvinas) currents**. 2001

[10] GORDON, A.L. Brazil - Malvinas Confluence – 1984. **Deep-Sea Research**, v. 36, p. 359–384, 1989.

[11] CASTRO, B.M.; LORENZZETTI, J.A.; SILVEIRA, I.C.A.;. MIRANDA, L.B, Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In: **O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região sudeste-sul do Brasil**,ROSSI and. WONGTSCHOWSKY C.L.D.B, eds.), ch. 1, p. 11–20, São Paulo: Edusp, 2006.

[12] PODESTÁ, G.P. Utilización de datos satelitarios en investigaciones oceanográficas y pesqueras en el Océano Atlántico Sudoccidental. In: **El mar argentino y sus recursos pesqueros**. (BOSCHI E.E., ed.), p. 195– 222, 1997.

[13] MÖLLER, O.O.J.; PIOLA, A.R.; FREITAS, A.C.; CAMPOS, E.J.D., The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America, **Continental Shelf Research**, 2008.

[14] PIOLA, A.R.; MATANO, R.P.; PALMA, E.D.; MOLLER, O.O.; CAMPOS, E.J. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. **Geophysical Research Letters**, v. 32, p. L01603, 2005.

[15] BRAGA, M.F.; KRUSCHE N. Padrão de ventos em Rio Grande, RS, no período de 1992 a 1995. **Atlântica**, v. 22, p. 27–40, 2000.

[16] MARQUES, W.C.; FERNANDES, E.H.L.; MONTEIRO, I.O.; MÖLLER, O.O; Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. **Continental ShelfResearch**, v. 29, p. 556–571, 2009.

[17] MARQUES, W.C.; FERNANDES, E.H.L.; MÖLLER, O.O.Straining and advection contributions to the mixing process of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 115a, J 2010.

[18] MARQUES, W.C.; FERNANDES, E.H.; MÖLLER, O.O.; MORAES, B.C.; 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**, v. 115b, 2010.

[19] CAPELETTO, G.J.; DE MOURA, G.H.Z. **Balanço Energético do Rio Grande do Sul 2010: ano base 2009**. Porto Alegre, Grupo CEEE / Secretaria de Infra-Estrutura e Logística do Rio Grande do Sul, 2010. 240p.

[20] DOUGLAS, C.A.; HARRISON, G.P.; CHICK, J.P. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: **Journal of Engineering for the Maritime Environment**," Environment, 2008.

[21] GORLOV, B. A. **Helical Turbine and Fish Safety**, p. 1–14, 2010.

[22] MÖLLER, O.O.; CASTAING, P.; SALOMON J.C.; LAZURE P. The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. **Estuaries**, v. 24, p. 297–311, 2001.

[23] VIEGAS J.S.; FRANZ, A.F.H. **Hidrologia do Canal de São Gonçalo**. tech. rep., FURG-UFPEL, Pelotas, 2006.

[24] MONTEIRO, I.O.; PEARSOM M.; MÖLLER, O.O.; FERNANDES, E.H.L. Hidrodinâmica do Saco da Mangueira: mecanismos que controlam as trocas com o estuário da Lagoa dos Patos. **Atlântica**, v. 27, p. 8–101, 2006.

[25] FERNANDES, E.H.L.; DYER K.;R.; MÖLLER, O.O. On the hydrodynamics of the world's largest choked coastal lagoon: Patos Lagoon (Brazil). **Estuaries**, 2001.

[26] FERNANDES, E.H.L.; DYER, K.R.; MÖLLER, O.O.; NIENCHESKI L.F. The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Niño event (1998). **Continental Shelf Research**, v. 22, p. 1699–1713, 2002.

[27] COSTA, R.L; MÖLLER, O.O. Estudo da estrutura e da variabilidade das correntes na área da plataforma interna ao largo de Rio Grande (RS , Brasil), no sudoeste do Atlântico Sul , durante a primavera-verão de 2006-2007. **Journal of Integrated Coastal Zone Management,** v. 11, n. 3, p. 273–281, 2011.

[28] HAMMONS, T.J. "TidalpPower. In: **Proceedings of the IEEE**, pp. 419– 433, 1993.

[30] MYERS, L.; BAHAJ, A.S. Simulated electrical power potential harnessed by marine current turbine arrays in the Alderney Race. **Renewable Energy,** v. 30, 1713-1731, 2005.

[31] GILES, J.; MYERS, L.; BAHAJ, A.S.; SHELMERDINE, B. The downstream wake response of marine current energy converters operating in shallow tidal flows. **World Renewable Energy Congress**. Linköping, Sweden. 2011.

[32] LI, Y; CALISAL, S.M. Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine. **Renewable Energy**, v. 35, 2325-2334, 2010.

[33] BAHAJ, A.S.; MYERS, L. Analytical estimates of the energy yeld potential from the Alderney Race (Channel Islands) using marine current energy converters. **Renewable Energy,** v. 29, 1931-1945, 2004.

[34] TORRENCE, C.; COMPO, G.P. **A practical guide to wavelet analysis**. tech. rep., Bulletin of the American Meteorological Society., 1997.

[35] MORETTIN, P.A. **Ondas e ondaletas: da análise de Fourier à análise de ondaletas**. São Paulo, Brasil. Edusp, 2004.