SIMULAÇÃO DE ONDAS OCEÂNICAS NA COSTA SUL-SUDESTE BRASILEIRA PARA ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO

PHELYPE HARON OLEINIK[1], WILIAM CORREA MARQUES[2], EDUARDO DE PAULA KIRINUS[3]

RESUMO

Com o desenvolvimento tecnológico e o aumento da população mundial existe grande demanda de energia que pode ser suprida de forma renovável. Uma forma de transformação desta forma de energia é pela conversão da energia cinética das ondas oceânicas em energia elétrica. Para obter um bom retorno da implantação destes conversores de energia se faz necessário a utilização de modelos numéricos, que simulam o estado do mar e permitam a obtenção da previsão do potencial energético. No presente trabalho o modelo TOMAWAC foi utilizado para simular ondas na plataforma continental Sul-Sudeste brasileira, que foram avaliadas em busca de locais de alto potencial energético. A simulação foi realizada entre janeiro e dezembro de 2006 e os resultados indicam que na região costeira valores médios de 1,25 m de altura de onda podem ser observados. O período médio das ondas varia entre 7,5 e 9 s para toda a região e a direção média indica a dominância de ondas que vem de sudeste alcançando a zona costeira. A região costeira mostra valores médios para o potencial energético entre 10 e 20 kW/m e os maiores valores médios são observados na Bacia de Santos, alcançando 25 kW/m nas proximidades de Ilhabela.

PALAVRAS-CHAVES: CONVERSÃO DE ENERGIA DE ONDAS. MODELO MATEMÁTICO. TOMAWAC.

OCEANIC WAVES SIMULATION ON THE SOUTH-SOUTHERN BRAZILIAN CONTINENTAL SHELF FOR POTENTIAL POWER ANALYSIS.

ABSTRACT

Along with the technological development and world population growth a high energy demand was created, which must be supplied cleanly and efficiently. One way to transform this form energy is through the conversion of ocean waves kinetic energy to electricity. To get a good refund for these converters numerical models are used to simulate the sea state to forecast the potential power. In this paper the model TOMAWAC was used to simulate waves in the South-Southern Brazilian Continental Shelf, with the purpose to find the most suitable location for power conversion in order to implement energy converters. The numerical simulation was performed for the entire 2006 year and the results showed that along the coastal region average significant height of 1,25 m were observed. The peak period of the waves varies between 7,5 to 9 s for the entire region, in addition, the average direction

[1]Escola de Engenharia – FURG. Graduando em Engenharia Civil Costeira e Portuária. E-mail: phe.h.o1@gmail.com

[2]Instituto de Matemática Estatística e Física – FURG. Doutor em Oceanografia Física, Química e Geológica. E-mail: wilian_marques@yahoo.com.br

[3]Instituto de Oceanografia – FURG. Mestre em Modelagem Computacional. E-mail: ekirinus@gmail.com

peak shows a highly dominance of waves coming from southeast reaching the coast. The coastal region shows average values for the power potential between 10 to 20 kW/m with the higher mean values being observed in Bacia de Santos, reaching 25 kW/m near Ilhabela.

KEYWORDS: WAVE POWER CONVERSION. MATHEMATICAL MODEL. TOMAWAC.

1. INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento tecnológico das últimas décadas criou uma crescente demanda por fontes de energia, a qual durante muito tempo foi satisfeita por fontes de energia não renováveis, como o petróleo. Por outro lado, tais fontes na maioria dos casos são poluentes e em algum momento serão exauridas. Com esta visão de futuro, muitas das pesquisas atuais procuram encontrar e viabilizar métodos de conversão de energia limpa e renovável.

Algumas das fontes de energia renovável que existem já estão sendo utilizadas, como a solar e a eólica, mas há outras pouco exploradas devido à complexidade do estudo necessário. Uma delas é o oceano, que devido à forçantes meteorológicas e astronômicas está sempre gerando energia na forma de ondas e correntes. Porém, devido à sua grande área, não é possível fazer um monitoramento observacional completo. Então, a modelagem matemática pode ser utilizada, visto que com o advento da era computacional se tornou um método barato e de fácil implementação para estudos oceânicos.

Para a transformação eficiente de energia elétrica é necessário, além da tecnologia de conversão, que já existe e está constantemente sendo aprimorada, um mapeamento dos locais em que pretende-se implantar esta tecnologia para que seja possível realizar um estudo de viabilidade de implantação, bem como previsões de quanta energia pode ser convertida.

A forma mais comum de ondas são as geradas pela ação dos ventos sobre a superfície do oceano. A energia é transferida do vento para a água quando este atua sobre a superfície do oceano resultando na formação de ondas. A quantidade de energia presente em uma onda depende diretamente da intensidade do vento, da sua área de atuação sobre a água (*fetch*) e do tempo de atuação.

É possível classificar as ondas como vagas (*sea*) ou ondulações (*swell*). As vagas são pequenas ondas, que podem ser diferenciadas das ondulações pela sua frequência. A frequência das vagas podem variar de 0,18 a 0,4 Hz (período de 2,5 a 5,5 s), enquanto que a frequência das ondulações é menor, variando de 0,03 a 0,18 Hz

(período 5,5 a 33 s) [2]. As vagas não possuem muita energia, pois foram formadas por ventos locais, e essa energia é logo dissipada pela tensão de superfície, fato que torna este tipo de onda pouco interessante para estudo. As ondulações são produto de ventos distantes, mais fortes e que duraram mais tempo, portanto possuem uma maior quantidade de energia e podem percorrer longas distâncias antes de serem dissipadas [8]. A dissipação da energia da onda pode ocorrer por quebra, *whitecapping* (arrebentação parcial) ou atrito com o fundo [12].

A área de estudo compreende a plataforma continental brasileira desde o Chuí (33º S) até o sul do Rio de Janeiro (22º S) e vai da linha de costa até, aproximadamente, a isóbata de 4500 m (FIGURA 1).

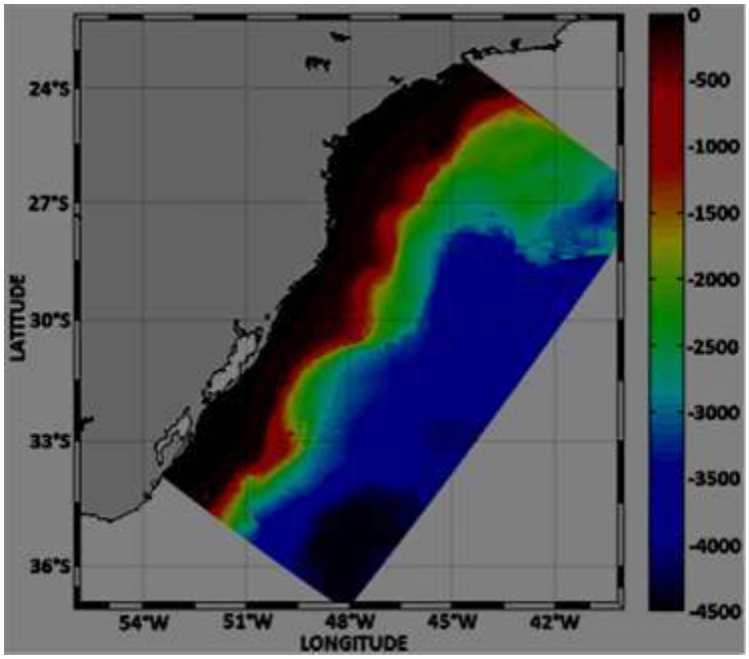

Figura 1 Área de estudo. Profundidade em metros.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise do comportamento médio das ondas geradas pelo vento na Plataforma Continental Sul-Sudeste do Brasil, de forma a identificar possíveis locais para a instalação de conversores de energia elétrica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os modelos matemáticos utilizados para a simulação de ondas geradas pelos ventos são divididos de acordo com a interação entre os componentes do espectro de energia. Os modelos de primeira geração calculam os parâmetros de onda (altura,

direção e período) de forma independente, sendo a sua interação desconsiderada. Os de segunda geração calculam a interação de forma parametrizada, impedindo o crescimento independente dos componentes do espectro. Os modelos de terceira geração não possuem nenhuma restrição da interação dos componentes do espectro e são baseados na equação do balanço de energia. Estes são os primeiros a resolver a equação da ação de onda completamente, ao custo de necessitar um poder de processamento de dados muito maior em relação aos de primeira e segunda geração.

O modelo utilizado para as simulações foi o TOMAWAC (*TELEMAC-Based Operational Model Addressing Wave Action Computation*), componente do sistema de modelagem TELEMAC [3]. O TOMAWAC é um modelo de terceira geração baseado na Equação (1) da conservação de densidade de ação da onda, que calcula ondas geradas pela ação de ventos, *shoaling* (empinamento da onda), interações não lineares, dissipação de energia por *whitecapping*, fricção de fundo e quebra induzida pela onda [5,10].

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \dot{x}\frac{\partial N}{\partial x} + \dot{y}\frac{\partial N}{\partial y} + \dot{k}_x\frac{\partial N}{\partial k_x} + \dot{k}_y\frac{\partial N}{\partial k_y} = \mathrm{Q}(k_x, \mathrm{k}_y, \mathrm{x}, \mathrm{y}, \mathrm{t}) \quad (1)$$

onde, *N* é o espectro direcional de densidade de ação de onda, *x* e *y* são as coordenadas no sistema cartesiano, k_x *e* k_y são as componentes em *x* e *y* do vetor número de onda e *t* é o tempo. A Equação 1 expressa que em um caso geral de ondas se propagando em um meio não homogêneo e não estacionário, como um meio a ação de correntes e ou variações espaciais do nível do mar, a ação das ondas é preservada dentro dos termos fonte e sumidouro definido pelo termo *Q*.

A Equação 1 representa uma equação de transporte, pois através da consideração das equações de Hamilton, pode ser demonstrado que:

$$\frac{\partial \dot{x}}{\partial t} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{k_x}}{\partial k_x} + \frac{\partial \dot{k_y}}{\partial k_y} = 0 \quad (2)$$

desta forma, a Equação 1 pode ser escrita na seguinte forma:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \vec{V}.grad_{\vec{x},\vec{y}}(N) = Q \quad (3)$$

Quando definimos que: $V = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{k_x}, \dot{k_y})$. Nesta forma a Equação 3 pode ser utilizada em outros sistemas de coordenadas e, por exemplo, (k, ɵ), (f_a, ɵ), ou (fr, ɵ) podem ser usados para a discretização do espectro direcional de ondas [5,10].

As taxas de transferência são dadas pela teoria linear de ondas [1,5,6,10]:

$$\dot{x} = C_g \frac{k_x}{k} + U_x \tag{4a}$$

$$\dot{y} = C_g \frac{k_y}{k} + U_y \tag{4b}$$

$$\dot{k_x} = -\frac{\partial\sigma}{\partial d}\frac{\partial d}{\partial x} - \vec{k}\frac{\partial \vec{U}}{\partial x} \tag{4c}$$

$$\dot{k_y} = -\frac{\partial\sigma}{\partial d}\frac{\partial d}{\partial y} - \vec{k}\frac{\partial \vec{U}}{\partial y} \tag{4d}$$

onde $\bar{U}$ é a velocidade da corrente (integrada na profundidade), σ é a frequência angular relativa que é observada a partir de um sistema de coordenadas que se move com velocidade $\bar{U}$. σ é dada pela relação de dispersão (Equação 6) em caso de corrente nula e Cg é a velocidade de grupo relativa das ondas, i.e., como é observado em um sistema de coordenadas que se movendo com a velocidade da corrente:

$$C_g = \frac{\partial\sigma}{\partial k} = n\frac{\sigma}{k}, \text{onde} n = \frac{1}{2}(1 + 2\frac{kd}{\sinh(2kd)}) \tag{5}$$

$$\sigma^2 = gk\tanh(kd) \tag{6}$$

Nestas equações: g representa a aceleração da gravidade e d a profundidade. Através de uma mudança de variáveis de (x, y, k_x, k_y) para (x, y, fr, θ), onde fr representa a frequência relativa dada por $fr = \sigma/(2\pi)$ e θ a direção de propagação das ondas, pode ser demostrado que a seguinte relação existe para o espectro direcional de ação de ondas em ambos os sistemas de coordenadas [9]:

$$N(x, y, k_x, k_y, t) = \frac{CC_g}{2\pi\sigma}\tilde{\mathrm{N}}(x, y, f_r, \theta, t) = \tilde{B}\tilde{F}(x, y, f_r, \theta, t) \tag{7}$$

onde C é a velocidade de fase das ondas, e definindo por:

$$C = \sigma/k \tag{8}$$

A Equação 1 da evolução pode ser escrita como:

$$\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial t} + \dot{x}\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial x} + \dot{y}\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial y} + \dot{\theta}\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial \theta} + \dot{f_r}\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial f_r} = \tilde{B}\tilde{Q}(x, y, \theta, f_r, t) \tag{9}$$

que é a equação efetivamente resolvida pelo modelo numérico TOMAWAC, com as seguintes taxas de transferência, obtidas pela teoria linear de ondas:

$$\dot{x} = C_g \sin(\theta) + U_x \tag{10a}$$

$$\dot{y} = C_g \cos(\theta) + U_y \tag{10b}$$

$$\dot{f}_r = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{\partial \sigma}{\partial d}\left(\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U}\vec{\nabla} d\right) - C_g \vec{k}\widetilde{G_L}(\vec{U})\right] \tag{10c}$$

Os operadores $\widetilde{G_n}$ e $\widetilde{G_L}$ são referentes ao cálculo da função gradiente na direção normal e tangencial, respectivamente à curva característica com direção θ:

$$\widetilde{G_n}(g) = \vec{n}\vec{\nabla} g = \cos(\theta)\frac{\partial g}{\partial x} - \sin(\theta)\frac{\partial g}{\partial y} \tag{11a}$$

$$\widetilde{G_L}(g) = \vec{t}\vec{\nabla} g = \sin(\theta)\frac{\partial g}{\partial x} + \cos(\theta)\frac{\partial g}{\partial y} \tag{11b}$$

Além disso, usando a relação de dispersão (Equação 6), pode ser verificado que:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial d} = \frac{\sigma k}{\sinh(2kd)} \tag{12}$$

O termo fonte e sumidouro Q e $\tilde{Q}$, das Equações 1 e 9, respectivamente, são compostos por processos físicos pertencentes ao domínio de aplicação do TOMAWAC:

$$Q = Q_{\text{in}} + Q_{ds} + Q_{nl} + Q_{bf} + Q_{br} + Q_{tr} \tag{13}$$

onde Q_{in} é a geração de ondas pela ação do vento, Q_{ds} é a dissipação de energia por *whitecapping*, Q_{nl} é a interação não linear entre os quadrupletos de frequência, Q_{bf} é a dissipação de energia devida à fricção com o fundo, Q_{br} é a dissipação de energia devida à quebra induzida pela batimetria, e Q_{tr} são as interações não lineares entre os tripletos de frequência.

As taxas de transferência espaciais $\dot{x}$ e $\dot{y}$ (Equações 10a e 10b) modelam a propagação espacial e o empinamento da onda. A taxa de transferência direcional $\dot{\theta}$) modela a mudança da direção de propagação da onda induzida pela refração. A refração é gerada pela variação espacial das propriedades do ambiente no qual a onda se propaga, que pode ser devido à variação batimétrica ou a um gradiente de correntes.

A taxa de transferência da frequência relativa $\dot{f}_r$ (Equação 10c) modela as mudanças da frequência relativa devido às variações do nível do mar no espaço e no tempo e/ou variações de corrente no espaço. Por fim, no que diz respeito aos termos fonte, pode ser mencionado que uma mudança no sistema de coordenadas em termos do fator $\tilde{B}$ permite a troca do termo *Q* para um termo$\tilde{Q}$que é expresso diretamente em termos da variação direcional do espectro com a variação $\tilde{F}(f_r, \theta)$.

O modelo TOMAWAC foi utilizado em seu modo não estacionário, onde o espectro direcional das ondas foi decomposto em um número finito de frequências e direções de propagação. A equação da conservação da densidade de ação da onda foi resolvida para cada componente com o modelo de terceira geração WAM [5,11] visto que ele não impõe nenhuma parametrização sobre a distribuição direcional ou espectral da energia ou da ação da onda. Toda componente do espectro da ação da onda evolui no tempo de acordo com os processos modelados pelo TOMAWAC.

Neste trabalho, o domínio de aplicação do TOMAWAC é representado por uma malha numérica de 111742 nós. Este domínio compreende o oceano, onde a profundidade relativa (relação de *d/L*, onde *d* é a profundidade e *L* o comprimento da onda) é maior que 0,5 e os processos dominantes são: a geração de ondas pela ação do vento, dissipação por *whitecapping* e interação não linear entre quadrupletos de frequência.

O domínio também incorpora a região mais próxima a linha de costa, com profundidades relativas entre 0,5 e 0,05, onde além das forçantes oceânicas, são levadas em conta o atrito com o fundo e o *shoaling*. Por fim, o domínio praial com áreas de profundidade relativa menor que 0,05 foi considerado, de forma que nestas áreas, foi incluído o atrito com o fundo, a arrebentação devido à batimetria, interações não lineares entre tripletos de frequência e a variação do nível do mar.

A altura significativa das ondas (Equação 14) é um parâmetro estatístico que representa o padrão de ondas de um determinado local. Este parâmetro é calculado pelo TOMAWAC utilizando a variância (m_0) do espectro de altura de ondas assumindo que as alturas de onda estejam distribuídas de acordo com a lei de Rayleigh [9].

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \tag{14}$$

O cálculo do potencial energético das ondas é realizado através da integração do espectro direcional de energia (Equação 15) calculado para todas as frequências e direções discretizadas de onda, conforme:

$$\sum_{f}^{f+df} \sum_{\theta}^{\theta+d\theta} \quad \frac{1}{2} \rho g a_m^2 \tag{15}$$

onde: ρ é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade e a_m é a amplitude das ondas. A partir deste resultado integrado, o modelo TOMAWAC utiliza a velocidade de grupo C_g (Equação 5) de forma a estimar a potência por unidade de altura da onda [9].

2.1. Condições Iniciais e de Contorno

O modelo numérico foi inicializado do repouso e forçado em seus contornos pela imposição de um espectro de ondas e ação de ventos. O período de estudo contempla todo o ano de 2006, e o contorno oceânico é prescrito pelos valores dos parâmetros de altura significativa, período de pico e direção média de ondas, gerados pelo modelo de previsão de ondas *WAVEWATCH III* (WW3), obtidos do site da NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*) [4]. Foram utilizados dados que representam toda área para o período do estudo. No contorno superficial, as variações espaço-temporais do vento foram representadas através de dados da página da NOAA, interpolados e aplicados ao domínio do modelo numérico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo foi realizado através da utilização dos resultados de uma simulação numérica cobrindo o período entre janeiro e dezembro de 2006. Os valores médios encontrados para os parâmetros de altura significativa, período de pico, direção média e potência de onda por unidade de altura serão apresentados na sequência dos resultados.

Os valores médios de altura significativa das ondas foram calculados para todo período de estudo. A FIGURA 2 mostra que os valores médios para a altura significativa são maiores na região oceânica, alcançando valores superiores a 1,75 m, enquanto que ao longo da região costeira os valores médios são menores que 1,25 m. Os resultados médios mostram ainda que a região da Bacia de Santos apresentam maiores valores de altura significativa sobre a região da plataforma continental. Os resultados apresentados mostram uma boa correlação com os resultados obtidos por Pianca [7] que apresenta uma média de 2,3 m para a região sul do Brasil e 2 m para a região sudeste.

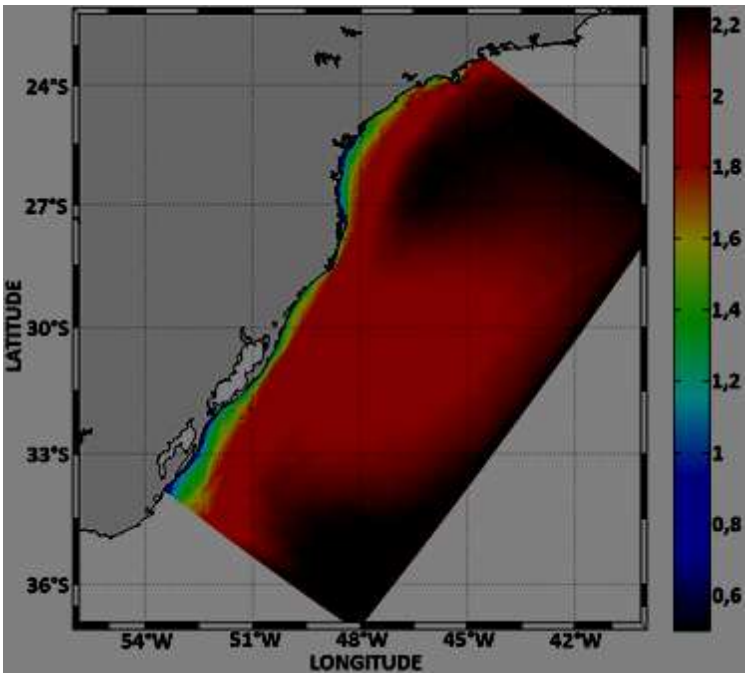

Figura 2: Altura significativa (m) média de ondas para todo o período de estudo.

A FIGURA 3a mostra a média do período das ondas para o ano de 2006, que varia entre em valores 7,5 e 9 s para toda a região de estudo, indicando a ocorrência mais significativa de ondulações (ondas tipo "*swell*") para a região de estudo. As regiões mais distantes da costa apresentam os maiores períodos, enquanto que na região localizada sobre a plataforma continental, os períodos das ondas ocorrem entre 8 e 8,5 s. A região da costa de São Paulo, próxima à Ilhabela, são observadas as ondas de maiores alturas significativas (FIGURA 2) e maiores períodos. Em regiões próximas à costa há uma diminuição do período das ondas, embora a diferença entre a costa e o oceano seja da ordem de 1,1 s.

A FIGURA 3b mostra a média da direção de pico das ondas durante o ano de 2006. Os resultados indicam uma predominância de ondas de sudeste (direções entre 270º e 360º) em regiões próximas à costa e ondas de nordeste (direção entre 180º e 270º) em regiões mais distantes. Um estudo realizado em 2010 por Pianca [7], que abrange o período de 11 anos entre janeiro de 1997 a dezembro de 2007, e cobre toda a costa brasileira relata as direções médias de ondas ao longo do ano. Este estudo mostrou que as direções de ondas observadas variam de sudoeste a nordeste ao longo do ano, com predominância de ondas de sudeste junto a região de estudo abrangida por este trabalho.

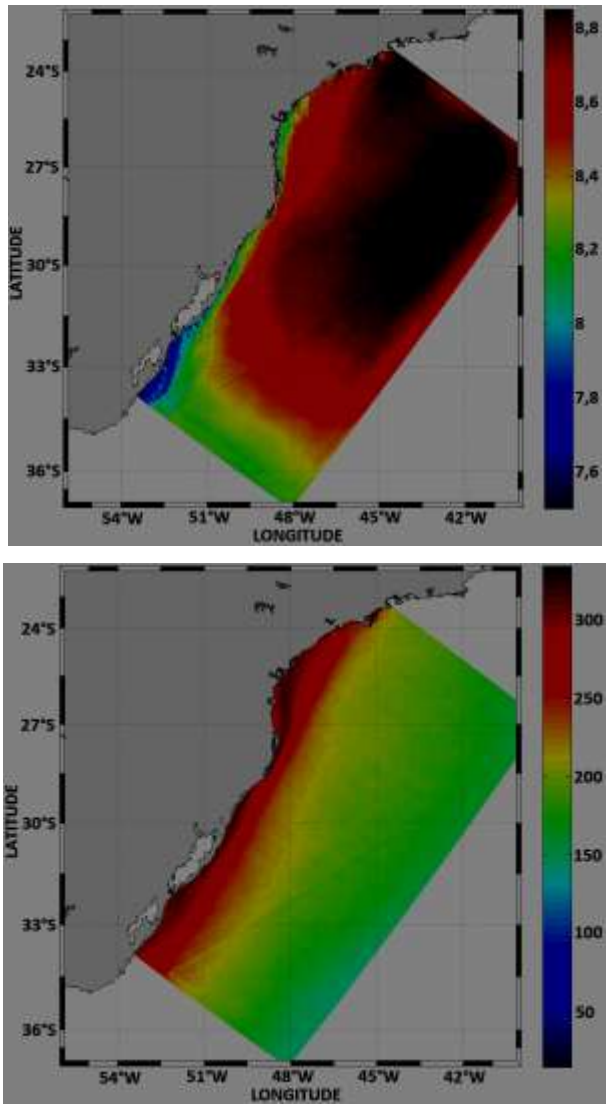

Figura 3: a) Período (s) e, b) Direção média (°) das ondas durante o período de estudo.

Por fim, é apresentado o potencial energético médio (FIGURA 4) medido de acordo com a altura das ondas da região de estudo. Os resultados indicam a relação de proporcionalidade com as alturas significativas de forma que a FIGURA 4 mostra os valores médios do potencial energético apresentando os maiores valores (maiores que 20 kW/m) na região oceânica. A região costeira mostra valores médios entre 10 e 20 kW/m, e novamente os maiores valores médios são observados na Bacia de Santos, alcançando 25 kW/m nas proximidades de Ilhabela.

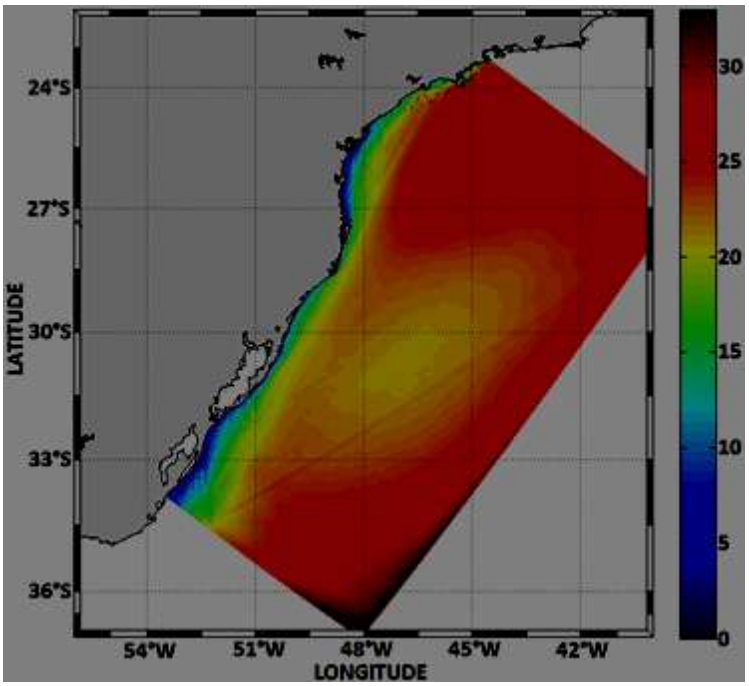

Figura 4: Potencial energético médio (kW/m).

4. CONCLUSÃO

O modelo TOMAWAC foi utilizado para simular ondas na plataforma continental Sul-Sudeste brasileira, as quais foram avaliadas em busca de possíveis locais de alto potencial energético. A simulação foi realizada entre janeiro e dezembro de 2006, e os resultados indicaram que ao longo da região costeira valores médios de 1,25 m de altura de onda podem ser observados. O período médio das ondas variaram entre 7,5 e 9 s para toda a região, e a direção média indicou a dominância de ondas que vem de sudeste alcançando a zona costeira. A região costeira mostrou valores médios para o potencial energético entre 10 e 20 kW/m, e os maiores valores médios foram observados na Bacia de Santos, alcançando 25 kW/m nas proximidades de Ilhabela.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CHAOLIN, B. Modèle d'états de mer – Rapport nº1 – **Equations et méthodes de résolution**. Note EDF-LNH HE-42/89.068, 1989

[2] Disponível em: http://www.ndbc.noaa.gov/windsea.shtml.

[3] Disponível em: http://www.opentelemac.org.

[4] Disponível em: ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/.

[5] KOMEN, G. J.; Cavaleri, L.; Donelan, M.; Hasselmann, K.; Hasselmann, S.; Janssen, P. A. E. M. **Dynamics and modelling of ocean waves**. Cambridge, UK. Cambridge University Press 1994.

[6] MEI, C. C. **The applied dynamics of ocean surface waves**. New York, USA. John Wiley & Sons. 1983.

[7] PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, n 1, p.53-70, 2010.

[8] POND, S., PICKARD, G. L. **Introductory dynamical oceanography**. Oxford, UK. Pergamon Press, pp.: 207-252, 1986.

[9] RELATÓRIO TÉCNICO – TOMAWAC. **TOMAWAC: Software for sea state modeling on unstructured grids over oceans and coastal seas**. Release 6.1, Set. 2011.

[10] TOLMAN, H. L. A third-generation model for wind waves on slowly varying unsteady and inhomogeneous depths and currents. **Journal of Physics and Oceanography**, v. 21, p. 782-797, 1991.

[11] WAMDI GROUP. WAM-Model – A third generation ocean wave prediction model. **Journal of Physics and Oceanography**, v. 18, p. 1775-1810, 1988.

[12] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Guide to wave analysis and forecasting**. Pub. 702, Geneve, Switzerland 1998.

AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho agradecem à Agência Nacional do Petróleo (ANP) e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo financiamento parcial, através do pagamento de bolsas de estudo. Os autores agradecem também ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) por dar suporte a este trabalho sob os contratos: 456292/2013-6 e 305885/2013-8.