



XXIV CREAM  
Congresso Nacional de Estudantes  
de Engenharia Mecânica



Universidade Federal  
do Rio Grande



INSTITUTO FEDERAL  
RIO GRANDE DO SUL  
Campus Rio Grande

## XXIV Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 11 a 15/09/2017 – Rio Grande - RS

### ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDA NA PLATAFORMA CONTINENTAL BRASILEIRA

#### Ricardo Cardoso Guimarães

Universidade Federal do Rio Grande  
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros, Rio Grande, RS, Brasil  
ricardo\_guimaraes@hotmail.com.br

#### Phelype Haron Oleinik

Universidade Federal do Rio Grande  
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros, Rio Grande, RS, Brasil  
phe.h.01@gmail.com

#### Bruno Vasconcellos Lopes

Universidade Federal do Rio Grande  
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros, Rio Grande, RS, Brasil  
lopesbruno13@gmail.com

#### Wilian Correa Marques

Universidade Federal do Rio Grande  
Av. Itália km 8 Bairro Carreiros, Rio Grande, RS, Brasil  
wilian\_marques@yahoo.com.br

**RESUMO:** Energia de onda vem se tornando nos últimos anos, cada vez mais uma alternativa interessante de energia renovável devido ao grande aumento no número de pesquisas. Com base nisso, esse estudo tem o interesse de estudar o potencial energético da plataforma continental brasileira. Para alcançar o objetivo o modelo de simulação do estado do mar TOMAWAC foi utilizado para realizar uma simulação das condições de onda durante 4 anos. Os resultados mostraram que Arraial do Cabo, com potencial energético médio de  $10.39 \text{ kW.m}^{-1}$  foi o local dentre todos estudados que apresentou os maiores valores. Também foi possível observar que no Farol de Santa Marta os valores de potencial energético se aproximaram bastante dos encontrados em Arraial do Cabo, com uma vantagem de ter apresentado uma variabilidade menor.

**Palavras-Chave:** Ondas, Energia

**ABSTRACT:** Wave energy have become on the last years an interest alternative to the renewable energy subject due the high increase in studies over this area. With that in mind, this study aims to study the energetic potential of the Brazilian shelf. To achieve the goal, the sea state model TOMAWAC was used to simulate 4 year of wave conditions. The results showed that Arraial do Cabo, with a mean energetic potential of  $10.39 \text{ kW.m}^{-1}$  was the location with the highest values over all the studied sites. Also it was possible to notice that Farol de Santa Marta had it energetic potential values similar to the ones found for Arraial do Cabo, with one advantage of a slightly lower variability.

**Keywords:** Waves, Energy

### INTRODUÇÃO

A demanda cada vez maior por energia, causada majoritariamente pelo crescimento constante da população, trouxe consigo a necessidade de exploração de novas fontes de energia. Entretanto, legislações cada vez mais rigorosas fazem com que essa busca se restrinja principalmente as fontes renováveis, das quais muitas, já possuem uma exploração e um desenvolvimento científico consideravelmente extenso, como por exemplo, as fontes eólica e solar.

Por outro lado, os conhecimentos técnicos e teóricos, de outros meios de obtenção de energia ainda são pouco estudados, é o caso da energia das ondas, que por fatores como grande área, e modificação constante das forçantes, tanto meteorológicas tanto astronômicas, dificulta o constante monitoramento, o qual é estritamente necessário para uma análise de viabilidade.

Contudo, o avanço computacional vem cada vez mais viabilizando esses tipos de estudo, o que proporciona um avanço significativo para as análises do potencial energético de onda em grande escala e ao longo de um grande período de tempo. Diversos autores já realizaram trabalhos semelhantes, Reguero *et al.* (2015) realizou uma análise do potencial global de ondas caracterizando suas variações sazonais, interanuais e de longa escala através de uma reanálise de dados extraídos do modelo WAVEWATCHIII (WW3).

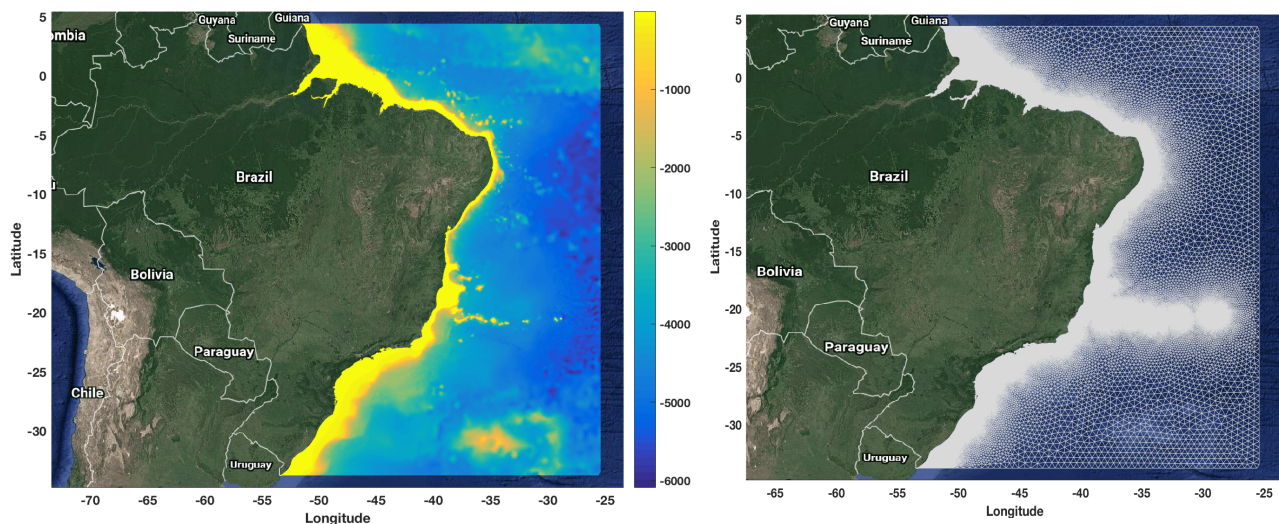
Por outro lado, Oleinik *et al.* (2016) realizaram análise do potencial de onda sobre a plataforma sul e sudeste brasileira concluindo que o maior potencial disponível se encontra no Cabo de Santa Marta, em Santa Catarina, Ilhabela, em São Paulo e na Ilha do Farol, no Rio de Janeiro. Os resultados também mostraram que a Ilha do Farol é localização com o maior potencial energético, assim como com as maiores variações ao longo do tempo, dentre os locais estudados.

Para que o potencial energético de ondas seja melhor conhecido ao longo de toda a costa brasileira, esse trabalho possui o objetivo de analisar diversas localizações, e suas variações anuais de curto prazo. Para alcançar o objetivo, o software de modelagem do estado do mar, TOMAWAC, foi utilizado para realizar uma simulação de 4 anos das ondas sobre a plataforma continental brasileira, e parte do oceano atlântico. Em seguida, os resultados foram analisados para que se observasse o comportamento interanual das ondas nessas localizações. Por último, uma busca foi realizada determinar localidades com potencial energético interessante de ser futuramente explorado.

## METODOLOGIA

O estudo se baseia na aplicação do modelo de onda de terceira geração TOMAWAC (TELEMAC-Based Operational Model Addressing Wave Action Computation) para simular o estado do mar sobre a plataforma continental brasileira e parte do oceano atlântico Fig. (1a), além de fazer uma análise das séries temporais de altura de onda significativa ( $H_s$ ) e potência de onda por unidade de comprimento de crista ( $P_w$ ), ao longo de um período de 4 anos, compreendidos entre 1997 e 2000.

O domínio espacial é representado por uma malha não estruturada composta de 547479 nós Fig. (1b), possuindo uma distância variável entre eles, partindo de 55 km próximo ao contorno até 1 km nas regiões mais próximas da costa. A resolução temporal para cada cálculo é de uma hora, enquanto a resolução para a saída dos resultados é de três horas.



**Figura 1.** (a) Batimetria da região estudada. (b) Malha não estruturada utilizada para a realização das simulações

## Modelo Numérico

TOMAWAC faz parte do sistema de modelagem TELEMAC ([www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)), sendo uma modelo de terceira geração para modelagem de ondas. TOMAWAC resolve a equação da conservação da densidade de ação da onda Eq. (1) para o espectro direcional da onda.

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

Onde  $N$  é o espectro direcional da onda,  $k_x$  e  $k_y$  são os componentes da direção  $x$  e  $y$  do vetor do número de onda. A Equação (1) expressa que para um caso geral de ondas que se propagam em um meio não homogêneo e não estacionário, a ação da onda é preservada nos termos fonte e sumidouro, representados pelo termo  $Q$ .

Para resolver a Eq. (1), TOMAWAC divide o espectro direcional de ação da onda ( $N$ ) em um número finito de frequências ( $f_i$ ) e direções ( $\theta_i$ ), resolvendo assim a Eq. (1) para cada um dos componentes ( $f_i, \theta_i$ ).

Ademais, o espectro de energia das ondas,  $E(f, \theta)$  pode ser associado com  $N(f, \theta)$  através da Eq. 2

$$E(f, \theta) = N(f, \theta) \rho g \quad (2)$$

onde  $\rho$  e  $g$ , são a massa específica da água e a aceleração da gravidade, respectivamente. A integração de  $E(f, \theta)$  ao longo das frequências e direções discretizadas conduz a Eq. (3), onde se tem a energia por unidade de área das ondas multidirecionais aleatórias, sendo  $a_m$ , a amplitude das ondas.

$$\sum_f^{f+df} \sum_\theta^{\theta+d\theta} \frac{1}{2} \rho g a_m^2 = E(f, \theta) df d\theta \quad (3)$$

### Condições Iniciais e de Contorno

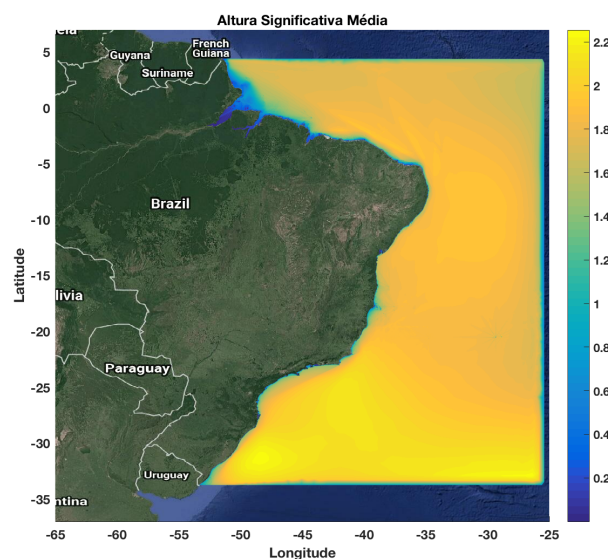
Para realizar a simulação o modelo numérico TOMAWAC foi inicializado do repouso. Os contornos oceânicos foram definidos pela imposição de altura significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ), e direção de pico ( $D_p$ ), obtidos a partir do banco de dados gerado pelo modelo de previsão de ondas WAVEWATCHIII (<ftp://polar.ncep.noaa.gov/history/waves>) com uma resolução espacial de  $0.5^\circ$  e resolução temporal de 3 horas.

Já para as condições superficiais, foram utilizado dados de vento do projeto de reanálise NCEP/NCAR pertencente a NOAA ([www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html](http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html)) com resolução espacial de  $1.875^\circ$  e resolução temporal de 6 horas.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

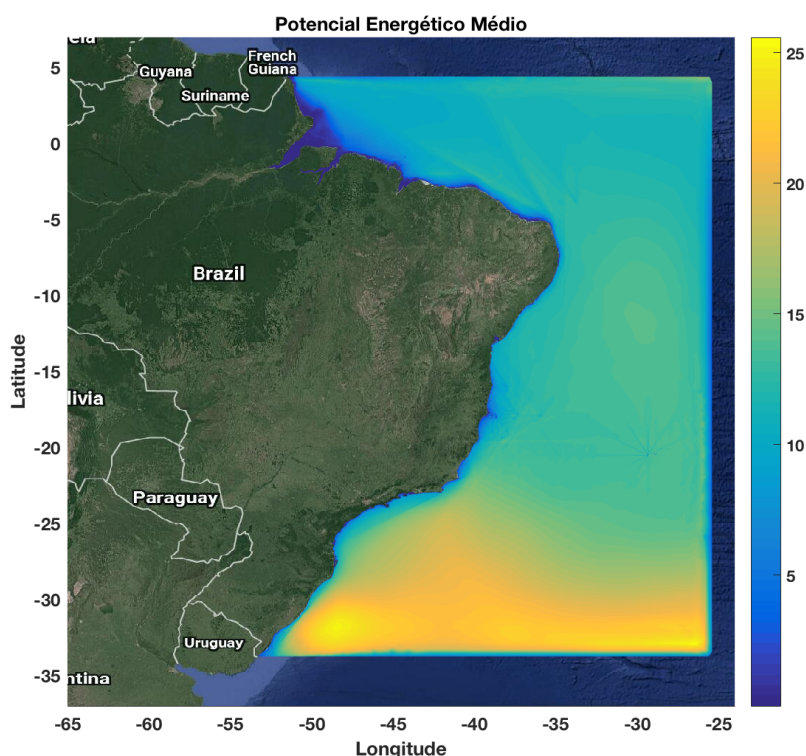
Com o intuito de uma análise mais aprofundada dos resultados, duas abordagens diferenciadas foram tomadas para que tanto o  $H_s$ , tanto o  $P_w$  das diversas localidades estudadas, fossem analisados e comparados entre si. Na primeira, foi criado um ano de resultados, a partir dos 4 anos simulados utilizando a média de cada dia dos anos. Já na segunda o período de 4 anos foi analisado para uma dada localidade, de modo que fosse possível observar a variabilidade dos parâmetros ao longo do período.

A Figura 2 mostra a média das alturas significativas ao longo dos 4 anos de estudo, é evidente a distribuição das maiores médias de  $H_s$  para a região sul da plataforma continental com valores chegando a 2.2 m, enquanto que na porção norte os valores ficam na média de 1.8 a 1.6 m. Também é possível notar que as alturas mais próximas a costa são consideravelmente menores se comparados aos valores em direção ao oceano.



**Figura 2.** Altura significativa (m) média de ondas para todo o período estudado

Já para o potencial energético de onda, Fig. (3), a discrepância é ainda maior entre as porções norte e sul do Brasil, evidenciando uma diferença média de aproximadamente  $10 \text{ kW.m}^{-1}$  para mais na região sul-sudeste do país. Os valores médios para essa região ficam na faixa de 15 a  $18 \text{ kW.m}^{-1}$  nas regiões mais afastadas da costa, enquanto que para a zona costeira, a média é de aproximadamente  $10 \text{ kW.m}^{-1}$ .



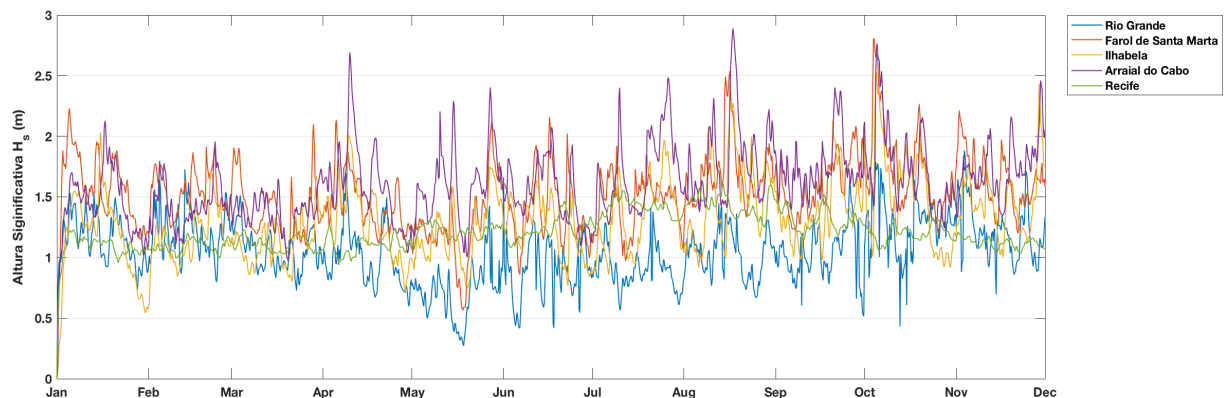
**Figura 3.** Potencial energético de ondas ( $\text{kW.m}^{-1}$ ) para todo o período estudado

Para uma análise local, cinco pontos foram escolhidos, são eles, Rio Grande (RS), Recife (PE) e três que são consideradas por Oleinik *et al.* (2016) como as localizações de maior energia de onda, sendo elas o Farol de Santa Marta (SC), Ilhabela (SP) e Arraial do Cabo (RJ). Como pressuposto por Oleinik *et al.* (2016) Arraial do Cabo apresentou as maiores médias de altura significativas Tab. 1, entretanto foi a que apresentou a maior variabilidade ao mesmo tempo Fig. (4). Para o potencial energético, novamente Arraial do cabo apresentou os maiores valores, entretanto apresentando uma diferença pequena do Farol de Santa Marta, o qual apresenta uma variabilidade um pouco menor.

**Tabela 1.** Propriedades das localidades estudadas

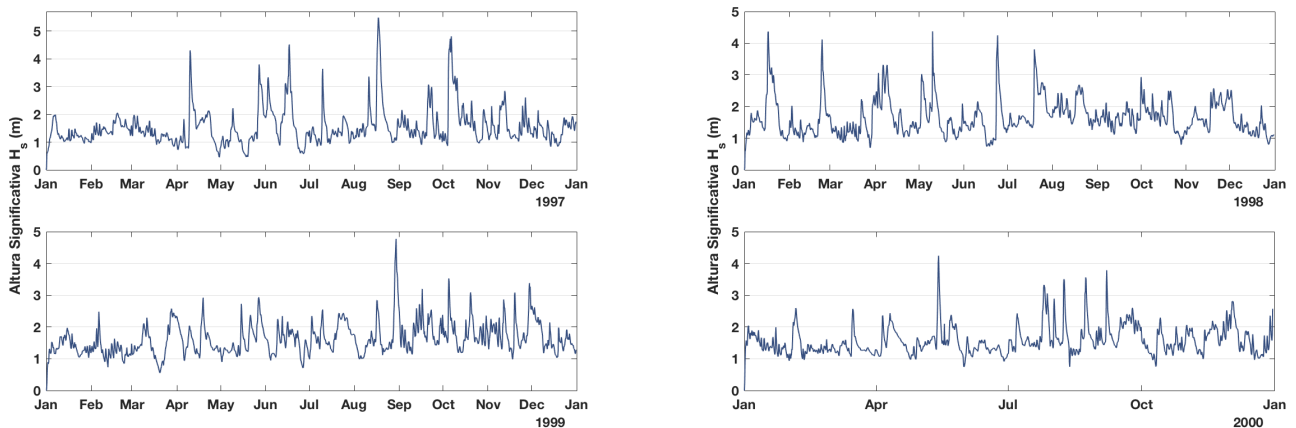
	$H_s$ (m)	Desvio Padrão (m)	$P_w$ ( $\text{kW.m}^{-1}$ )
Rio Grande	1.0499	0.2587	4.2695
Farol de Santa Marta	1.5224	0.2944	10.0043
Ilhabela	1.3062	0.3183	7.7353
Arraial do Cabo	1.6022	0.3153	10.3925
Recife	1.1979	0.1450	4.3325





**Figura 4** Série temporal da altura de onda média significativa dos 4 anos

Com o intuito de analisar brevemente a variabilidade em um curto período a Fig. (5), apresenta os diversos comportamentos da  $H_s$  em Arraial do cabo, local onde se obteve a maior variação no ano médio formado. Essas variações consideráveis entre os anos no comportamento das ondas podem ser relacionadas aos eventos extremos de El Niño e La Niña que segundo Tremberth *et al.* (2001) ocorreram nos anos de 1979 a 1999. Ademais, é possível notar que o ano de 1997 apresenta a maior  $H_s$  entre todos os anos, 5.7 m, enquanto que em 1998 a maior média é constatada, 1.80. Ambos anos são considerados eventos extremos tanto de El Niño quanto de La Niña, enquanto que em 2000 ano em que nenhum dos eventos ocorreu, é evidenciado a menor máxima de  $H_s$  entre todos os anos assim como apresentado por Guimarães *et al.* (2017),



**Figura 5.** Séries temporais de  $H_s$ , em Arraial do Cabo, para cada um dos anos estudados

## CONCLUSÃO

Com o intuito de analisar o potencial energético e a altura significativa de onda, o modelo TOMAWC se demonstrou satisfatório, apresentando valores para esses parâmetros condizentes com dados reais e outras literaturas. Ficou evidenciado, que os maiores valores tanto para  $H_s$ , tanto para  $P_w$  se localizam nas faixas mais ao sul e sudeste do Brasil, apresentando inclusive diferenças de considerável magnitude para o potencial energético, que possui seu maior valor dentre os analisados em Arraial do Cabo.

A variabilidade inerente a diferentes eventos climáticos também pode ser observada, ficando evidente, através da análise de séries temporais em Arraial do Cabo, as mudanças de  $H_s$  ao longo dos 4 anos estudados, inerentes dos eventos climáticos que aconteceram na mesma época.

Por ultimo, esse trabalho abre espaço para que uma análise mais detalhada e longa do potencial energético da costa brasileira possa ser realizado, podendo assim analisar detalhadamente a variabilidade, assim como potenciais médios de determinados locais para um período maior, o que se faz necessário para por exemplo, um estudo de viabilidade de implantação de um sítio de conversão de energia.



**XXIV CREEM**  
Congresso Nacional de Estudantes  
de Engenharia Mecânica



**Universidade Federal  
do Rio Grande**



**INSTITUTO FEDERAL**  
RIO GRANDE DO SUL  
Campus Rio Grande

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas fornecidas. Os autores também agradecem ao CNPq por patrocinar essa pesquisa por meio do contrato 304227/2016-1.

Outros agradecimentos vão para a Marinha do Brasil por disponibilizar os dados batimétricos para a região costeira; a NOAA por disponibilizar o banco de dados de vento, ao open TELEMAT-MASCARET([www.opentelemat.org](http://www.opentelemat.org)) por proporcionar a licença acadêmica do software TELEMAT. Os autores também agradecem ao Centro Nacional de Supercomputação (CESUP) e ao Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC) por disponibilizar seus recursos para o desenvolvimento dessa pesquisa. Por último, mesmo que alguns dados tenham sido retirados de organizações governamentais, esse trabalho não representa necessariamente opiniões governamentais.

## **REFERÊNCIAS**

- Guimarães, R.C, Oleinik, P.H., Marques, W.C., Kirnus, E.P.,2017, “The Wind Driven Waves Over The Brazilian Coast During Extreme El Niño and La Niña Years” Proceedings of the 10th Encontro Nacional De Gerenciamento Costeiro, Vol.1, Rio Grande, Brazil, pp. 259-260.
- Oleinik, P.H., Marques, W.C., Kirnus, E. de P. and Hodapp, M.J,2016, “Energetic potential assessment of wind-driven waves on the south-southeastern brazilian shelf”, Renewable Energy, Article under review.
- Trenberth, K. E. and Stepaniak, D. P.,2001, “Indices of El Nino evolution”, Journal of Climate, Vol.14, No. 8, pp. 1697-170.

## **DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE**

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso contido neste artigo.