

VALIDAÇÃO DE DADOS DE ONDA DE REANÁLISE DO ERA-INTERIM PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS

Rafael Luz Espindola – rafael.espindola@ufersa.edu.br

Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Campus Caraúbas, Departamento de Engenharia Mecânica

Alex Maurício Araújo – ama@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. *Este trabalho é um esforço de validação dos dados de reanálise do projeto ERA-Interim necessários para estimativa do potencial energético das ondas. Para tanto, foram realizadas análises estatísticas destes dados, comparando-os com dados obtidos de medição indireta por sensoriamento remoto pelo satélite de altimetria Jason-2/OSTM. Uma vez que os satélites de altimetria não medem o período da onda, foram utilizadas duas metodologias diferentes para estimar esses valores, a fim de serem utilizados na comparação. Como resultado, obteve-se uma correlação aceitável, uma vez que, para sete dos oito pontos analisados, o bias manteve-se abaixo de -0,16, e o coeficiente de Pearson próximo ou superior a 0,7. Os outros parâmetros também indicaram bons resultados, como índice de dispersão sempre inferior a 0,25, RMSE em geral baixo e com a razão dos desvios padrão não se afastando muito do valor 1. Com relação ao período da onda os resultados não foram conclusivos, mas a análise qualitativa indica uma tendência entre as séries de dados.*

Palavras-chave: *Validação; Altura Significativa da Onda, Período da Onda*

1. INTRODUÇÃO

Há algumas décadas o mundo busca encontrar soluções energéticas ambientalmente sustentáveis. Para isso, um grande esforço científico em pesquisas sobre energia eólica, solar, de biomassas, de ondas, e de outras fontes renováveis vem sendo feito. Por estar disponível, praticamente, ao redor de todo o mundo, a energia das ondas vem se mostrando bastante promissora. Além disso, o fato de ser uma fonte regular de energia e de ser mais previsível que outras fontes, como a eólica e a solar, contribuem para essa boa expectativa na sua utilização (Cruz, 2008).

Em escala global, diversos mapeamentos dessa fonte vêm sendo realizados desde a década de 1960. Podem ser citados como exemplo os trabalhos de Kinsman (1965), Pond e Pickard (1978), e mais recentemente os de Gunn e Stock-Williams (2012) e Arinaga e Cheung (2012).

Por abrangerem uma dimensão espacial muito grande, os estudos feitos a nível global apenas dão indicativos do potencial de cada região, sendo necessárias análises locais para uma melhor precisão do potencial existente. Na Europa diversos estudos vêm sendo realizados. Podemos citar como exemplos recentes: Vicinanza (2013), Gonçalves *et al.* (2014) e Kasiulis *et al.* (2015). Já o potencial energético dos outros continentes, comparativamente à Europa, foi pouco investigado. São exemplos de estudos na Ásia os trabalhos de Aoun *et al.* (2013), Liang *et al.* (2014). Nas Américas os de Hiles *et al.* (2014), Robertson *et al.* (2014). Na Oceania o de Behrens *et al.* (2012), além de trabalhos que envolvem regiões abrangendo mais de um continente, como os de Aydogan *et al.* (2013) e Zodiatis *et al.* (2014).

De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), esse tipo de energia é atrativo para ilhas e países com vasta extensão litorânea. O Brasil se encaixa nesse perfil, uma vez que é um país continental que apresenta uma faixa litorânea de mais de 7.000 km, onde se encontram 73% da sua população. Além disso ele possui uma ZEE (Zona Econômica Exclusiva) de mais de 3,6 milhões de km², aonde apenas áreas pontuais vêm sendo exploradas e, em geral, pela atividade petrolífera (Oliveira Filho, 2011).

Historicamente, o Brasil é um grande utilizador de fontes renováveis de energia como a hidroelétrica, fonte predominante na sua matriz. Porém, apesar de todo o seu litoral e da sua ZEE, poucos estudos visando o aproveitamento energético das ondas têm sido feitos. Pode-se citar, dentre esses poucos esforços o convênio entre a COPPE/RJ, Eletrobrás e Governo do Estado do Ceará, a fim de desenvolver e instalar a primeira usina de Energia das Ondas das Américas (Ricarte *et al.*, 2005).

Gonçalves *et al.* (2008) apresentam como motivos para a falta de estudos sobre aproveitamento da energia das ondas no Brasil a ausência de dados sobre o potencial energético do mar, a dificuldade de atração de investidores e a ausência de mecanismos institucionais, que incluam projetos de investimentos nesse tipo de geração de energia em programas de incentivos ao desenvolvimento de energias alternativas.

Essa falta de dados é resultado dos poucos estudos que têm sido realizados com o objetivo de caracterizar o potencial de que o país dispõe nessa área. Dentre estes poucos estudos podemos citar: o feito por Estefen (2003), que apresenta o potencial da costa entre as latitudes 19° S a 32° S; o feito por Ricarte (2007), onde é caracterizado o potencial da costa cearense; e outros dois trabalhos, o de Carvalho (2010) e o de Souza (2011), onde são feitos levantamentos do potencial de toda a costa brasileira.

Todos estes trabalhos citados, com exceção dos de Estefen (2003), apresentam em comum a utilização de medições diretas das ondas para em seguida estimar o seu potencial. Entretanto, de acordo com Ricarte (2007), o litoral brasileiro, em sua maior parte, ainda encontra-se desconhecido à luz de técnicas modernas de medições e caracterização dos seus oceanos, uma vez que são realizadas poucas medições e estas normalmente estão voltadas para atender as atividades petrolíferas. Essa falta de dados pode produzir resultados muito divergentes como acontece entre os estudos de Carvalho (2010) e Souza (2011), onde ocorre uma diferença de cerca de 80% entre os potenciais estimados.

Assim, o objetivo desse trabalho é validar os dados de reanálise do projeto ERA-Interim produzidos pela ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), em relação à dados obtidos por sensoriamento remoto, mais especificamente pelo satélite de altimetria Jason-2/OSTM, a fim de que esses parâmetros validados possam posteriormente serem utilizados para estimativa do potencial energético das ondas no litoral brasileiro.

2. MISSÃO ALTIMÉTRICA JASON-2/OSTM

O melhor modo de se caracterizar o clima de ondas de um local é a partir de longas séries temporais de medições *in situ*, principalmente por meio de boias. Porém, essa tipo de caracterização é complicado, uma vez que, por razões econômicas, o número de equipamentos de medição utilizados concomitantemente é limitado a poucos locais. Além disso, as boias existentes, em sua maioria, estão instaladas em regiões próximas à costa e no Hemisfério Norte, limitando assim os locais com acesso a dados (Caires e Sterl, 2001). Diante disso, as medições costumam ser utilizadas na calibração de modelos espectrais de onda de terceira geração (WAVEWATCH III, WAM, SWAM, MIKE 21 SW), cujos resultados são gerados a partir de dados de vento largamente disponíveis (Aydogan *et al.*, 2013).

Uma alternativa à medição direta para a caracterização das condições de onda de um local é através da utilização de medições indiretas obtidas por sensoriamento remoto, como por exemplo, por meio de observações feitas por satélites. Uma vantagem que os dados obtidos por satélites têm em relação aos obtidos com boias é a grande abrangência espacial que eles possuem, mesmo que para isso tenham que apresentar uma frequência de captação de dados menor para um mesmo local (Coli e Mata, 1996, e Pimenta *et al.*, 2008). Além disso, estudos como os de Ebuchi e Kawamura (1994), Gower (1996) e Challenor *et al.* (2006) indicam que os dados assimilados por satélite se aproximam bastante dos obtidos diretamente por boias.

O satélite altimétrico Jason-2/OSTM, lançado em 2008, é uma cooperação entre as agências CNES (*Centre National d'Études Spatiales*), EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*), NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Ele possui um altímetro que opera em duas frequências, 13,6 Ghz (Banda Ku) e 5,3 GHz (Banda C), com o objetivo de medir o nível oceânico, a altura da onda e a velocidade do vento. A altitude da órbita do Jason-2 é de 1.336 km, a mesma dos seus antecessores, o que reduz as interações dele com a atmosfera e com a gravidade terrestre a valores mínimos, tornando a determinação da órbita mais fácil e precisa. Além da altitude, sua órbita apresenta como característica uma inclinação de 66° no sentido norte-sul, o que possibilita uma cobertura de 90% das regiões não congeladas dos oceanos. Outra característica importante é o tempo de ciclo, que é de aproximadamente 9,9156 dias. Esse valor permite a obtenção de dados com boa resolução tanto espacial quanto temporal. Maiores informações podem ser obtidas em: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/missions/present-missions/jason-2.html>.

Uma grande desvantagem dos satélites de altimetria diz respeito aos dados da onda que ele consegue medir. Devido aos princípios físicos envolvidos, eles não medem nem o período, nem a direção da onda. Entretanto, ao menos no que diz respeito ao período da onda, diversos estudos já foram realizados com o objetivo de empiricamente se determinar e validar esse parâmetro. Dentre os estudos podemos citar Challenor e Srokosz (1984), Davies *et al.* (2001), Hwang *et al.* (1998), Gommenginger *et al.* (2003), Quilfen *et al.* (2004), Govidan *et al.* (2011) e Zhao *et al.* (2012).

2.1 Derivação do período da onda

Apesar dos diversos estudos realizados para derivação do período da onda a partir de dados medidos pelo satélite de altimetria, de acordo com Carter (1992) e Davies *et al.* (2001), essa área de estudo ainda se encontra em estágios iniciais. Durante as análises de validação foram utilizados os métodos propostos por Hwang *et al.* (1998) e Quilfen *et al.* (2004).

A metodologia proposta por Hwang *et al.* (1998) é uma relação empírica entre a altura de pico do campo de onda, T, a velocidade do vento, U, e a altura da onda, H, que se sintetiza na Eq. (1).

$$\frac{U}{gT} = 0,048 \left(\frac{U^2}{gH} \right)^{0,67} \quad (1)$$

onde g é a gravidade local. De acordo com Hwang *et al.* (1998), para o satélite de altimetria Topex/Poseidon (T/P), o período calculado utilizando a metodologia apresentou valores 6% menores que o período de pico medido pela boia utilizada na validação.

Já a metodologia desenvolvida por Quilfen *et al.* (2004) utiliza uma abordagem diferente baseada em redes-neurais (Eq.2), utilizando a altura significativa da onda, H_s e o coeficiente de *backscatter* da banda Ku, σ_{Ku} .

$$T_z = \exp(-17,1642A + 13,5844) \quad (2)$$

onde A é definido pela Eq. (3).

$$A = \frac{1}{1 + \exp(0,6573H_s^{0,1084} \sigma_{Ku}^{0,2962} - 2,2377)} \quad (3)$$

Há ainda uma metodologia complementar proposta por Quilfen *et al.* (2004) que utiliza os coeficiente de *backscatter* de ambas as bandas de frequência do satélite, porém decidiu-se não utilizá-la na análise.

3. ERA-INTERIM

ERA-Interim é a mais recente reanálise atmosférica global produzida pelo ECMWF. Seu período de cobertura se inicia em 1979 e continua até o presente momento. Os produtos dessa reanálise são dados gradeados que incluem uma larga variedade de parâmetros de superfície com resolução de 3h, que descrevem tanto o clima como ondas oceânicas e condições da superfície terrestre. Incluem também parâmetros aéreos com resolução de 6h, que cobrem a troposfera e a atmosfera (Dee et al., 2011).

O modelo de ondas utilizado para produzir alguns dos dados da reanálise do ERA-Interim é baseado no modelo espectral de onda de 3ª geração WAM, e inclui uma série de melhorias tanto nos aspectos físicos, quanto numéricos, em relação ao projeto anterior, o ERA-40. Dentre as melhorias apresentadas, as mais significativas para aplicações climáticas são a introdução de um solução para tratar efeitos batimétricos não resolvidos e a reformulação do termo de fonte de dissipação (Dee et al., 2011). O modelo apresenta uma resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$, o que equivale uma distância horizontal máxima de 110 km.

4. METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO

A potência da onda para águas ditas profundas, ou seja, onde o fundo oceânico não provoca interferência, pode ser calculada, como mostra a Eq. (4), em função da altura significativa da onda (H_s) e do período de energia (T_e).

$$P = 0,49T_e H_s^2 \quad (4)$$

Os dados de H_s e T_e podem ser obtidos a partir de reanálise com uma excelente resolução temporal e espacial. Para a validação desses dados, deve-se compará-los estatisticamente em relação a um dado medido. Optou-se pelos dados de satélite pela sua grande cobertura espacial, e aceitável resolução temporal, além da disponibilidade de informações no litoral brasileiro. Dessa forma, a primeira etapa da metodologia é a captação dos dados para a área de estudo selecionada.

Como as medições realizadas seguem a trajetória do satélite e os dados de reanálise obedecem uma grade retangular, é preciso que seja feito um ajuste dos dados, a fim de se obter resoluções idênticas. De acordo com Monaldo (1988), um par altímetro-boia, aqui estendido para altímetro-modelo, deve obedecer a um critério de distância horizontal menor que 50 km. Dessa forma, o ajuste é feito calculando-se a média dos dados de satélite localizados dentro de um quadrado imaginário ($1^\circ \times 1^\circ$) centrado no nó da grade retangular que cobre a área de seleção. A resolução dessa grade corresponde a dos dados de reanálise. Além disso, a mesma resolução temporal dos dados de reanálise deve ser adotado para os dados do satélite. Algumas regiões da área de estudo, devido ao percurso do satélite, não possuem dados. Para esses pontos, os dados de reanálise também foram desconsiderados nas análises seguintes.

Uma vez que as bases de dados estão no mesmo formato, são realizadas as análises estatísticas mensal e anual para cada um dos nós.

4.1 Análise Estatística

A partir dos dados selecionados e ajustados, são obtidos diversos parâmetros estatísticos a fim de se conhecer o comportamento da massa de dados. Esses parâmetros estatísticos são: bias (ou viés); raiz quadrada do erro médio (RMSE); razão entre os desvios padrões; coeficiente de correlação de Pearson (ρ); e índice de dispersão (SI).

O bias (Eq. 5) é um parâmetro que quantifica a diferença média entre dois conjuntos de dados. Apesar de fornecer uma ideia da tendência ou do erro sistemático, como os valores negativos se anulam com os valores positivos na somatória, ele geralmente leva a uma subestimação do erro.

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (5)$$

onde x_i e y_i são os dados de reanálise e de satélite, respectivamente, e n é o total de dados de cada variável.

Outro parâmetro estatístico calculado é o RMSE (Eq. 6), que relaciona a diferença entre duas variáveis, porém, sem o problema descrito anteriormente para o bias. Para esse parâmetro, quanto mais próximo de 0, mais similares serão as médias dos dois conjuntos de dados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (6)$$

O desvio padrão de cada conjunto fornece a informação da dispersão dos dados em relação à média. Assim, a razão entre os desvios padrão (Eq. 7) é uma medida da diferença entre o comportamento de dispersão das duas amostras. Os valores de razão serão positivos, com valores próximo a 1 indicando comportamento semelhante.

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

onde \bar{x} e \bar{y} são, respectivamente, as médias dos dados de reanálise e de satélite, e σ_x e σ_y são, respectivamente, os desvios padrão dos dados de reanálise e de satélite.

O coeficiente de correlação de Pearson (Eq. 8) mede o grau da correlação entre duas variáveis de escala métrica, assumindo valores entre -1 e 1, onde um valor igual a 1 significa correlação perfeita e positiva entre as duas variáveis. De forma semelhante, um valor igual a -1 significa correlação perfeita, porém negativa, ou seja, enquanto uma variável aumenta a outra diminui. Por sua vez, um valor igual a 0 significa nenhuma dependência linear entre as duas variáveis.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

Por fim, o índice de dispersão (Eq. 9) é uma medida normalizada do erro que leva em consideração as observações do satélite. Ele é uma medida padrão para comparação entre modelos de onda. Assim, valores pequenos de SI indicam um modelo robusto, que emula que boa precisão a realidade.

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) - (y_i - \bar{y})]^2}}{\bar{y}} \quad (9)$$

5. RESULTADOS

A fim de validar os dados de reanálise do ERA-Interim no litoral brasileiro, uma região retangular entre as latitudes 8°N e 37°S e as longitudes 28°O e 59°O foi selecionada, conforme mostra a Fig. 1. Para essa área, foram obtidos juntamente às agências ECMWF (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>) e AVISO+ (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/windwave-products.html>), respectivamente, os dados de reanálise e os dados do satélite de altimetria Jason-2/OSTM, entre o período de 01/07/2008 a 31/11/2014.

Os dados tiveram que passar por um pré-processamento a fim de igualar as resoluções temporais e espaciais. Nesse processo, todos os que estavam sinalizados como de qualidade duvidosa foram retirados, e em seguida separados e ajustado de acordo com a metodologia, resultando na grade de dados mostrada na Fig. 1b. O problema de região sem dados, destacado na Fig. 1b, pode ser resolvido com a utilização conjunta de mais de um satélite para formar a base de dados, desde que eles tenham inclinações e/ou repetitividades diferentes. Após a separação e ajuste dos dados, foram identificados ao longo de toda a área de estudo 632 nós que possuíam informações, com uma média de 255 dados por nó ao longo do período de quase 5 anos avaliado.

Nota-se a partir das Tab. 1 e Tab. 2 a existência de uma correlação aceitável entre as duas bases de dados, principalmente com relação à altura significativa, uma vez que, com exceção do ponto 6, o bias manteve-se abaixo de -0,16, e o coeficiente de Pearson, R, foi próximo ou superior a 0,7. Os outros parâmetros também indicam resultados aceitáveis, como índice de dispersão sempre inferior a 0,25, RMSE em geral baixo e com a razão dos desvios padrão não se afastando muito do valor 1. Além disso, o bias negativo indica que na média, os valores de altura significativa nos dados de reanálise foram inferiores aos do satélite. Dessa forma, a potência da onda que depende deste parâmetro apresentaria uma tendência a ser subestimada, o que é preferível a uma superestimação.

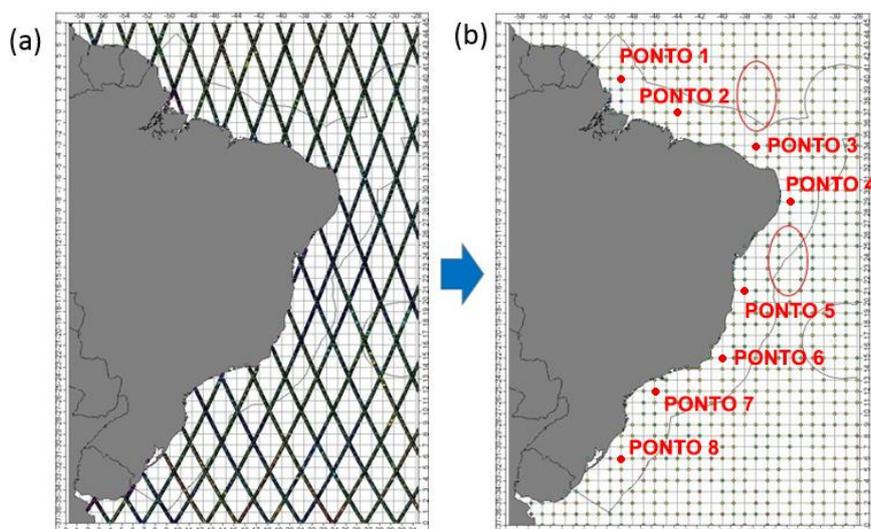


Figura 1 - Região de estudo selecionada com (a) os dados obtidos pelo Jason-2/OSTM, e (b) após o pré-processamento destes dados, com destaque para algumas regiões sem dados, e a localização dos pontos analisados.

Tabela 1 - Características de onda de pontos selecionados ao longo da costa brasileira.

Parâmetros Calculados	Ponto 1 3° N 49° O	Ponto 2 0° 44° O	Ponto 3 3° S 37° W	Ponto 4 8° S 34° O	Ponto 5 16° S 38° O	Ponto 6 22° S 40° O	Ponto 7 25° S 46° O	Ponto 8 31° S 49° O
Alt. Sig. Méd. ERA-Interim (m)	1,55	1,68	1,80	1,81	1,43	1,84	1,71	2,14
Alt. Sig. Méd. Jason-2 - Ku (m)	1,62	1,75	1,83	1,84	1,59	1,38	1,86	2,29
Alt. Sig. Méd. Jason-2 - C (m)	1,57	1,76	1,83	1,84	1,59	1,52	1,89	2,29
Período Médio ERA-Interim (s)	7,68	7,65	7,61	8,14	7,20	8,16	8,48	8,15
Período Médio Hwang – Ku (s)	7,49	7,61	7,51	7,72	7,11	6,29	8,38	8,33
Período Médio Hwang – C (s)	7,71	7,62	7,53	7,70	7,08	6,82	8,51	8,33
Período Médio Quilfen – Ku (s)	7,70	7,87	7,82	7,98	7,40	6,64	8,52	8,53
N° de dados	199	199	394	253	98	193	202	203

A análise estatística sintetizada na Tab. 2 pode ser considerada representativa de toda a área quando analisamos as Fig. 2-4. Nela percebe-se que a mesma tendência descrita é observada quando analisamos todos os 632 pontos durante todo o intervalo de tempo. E percebe-se uma correlação qualitativa entre as distribuições de frequência das médias, sejam elas das altura significativas da onda ou as do período da onda que corrobora com os valores estatísticos encontrados.

Tabela 2 – Síntese da análise estatística anual para oito pontos selecionados ao longo da costa brasileira.

Parâmetros Estatísticos	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Ponto 4		
	H _s	T _{e, hwa}	T _{e, qui}	H _s	T _{e, hwa}	T _{e, qui}	H _s	T _{e, hwa}	T _{e, qui}	H _s	T _{e, hwa}	T _{e, qui}
Bias	-0,07	0,20	-0,02	-0,07	0,04	-0,22	-0,03	0,09	-0,21	-0,03	0,43	0,16
RMSE	0,30	0,87	1,02	0,21	0,89	0,85	0,23	1,05	1,04	0,27	1,24	1,15
$\sigma_{rea}/\sigma_{sat}$	1,22	1,38	1,14	1,03	0,97	0,86	1,01	0,80	0,72	1,05	1,04	0,96
R	0,69	0,49	0,54	0,82	0,66	0,68	0,77	0,51	0,51	0,69	0,25	0,24
SI	0,18	0,16	0,13	0,11	0,12	0,10	0,12	0,14	0,13	0,15	0,15	0,14
Parâmetros Estatísticos	Ponto 5			Ponto 6			Ponto 7			Ponto 8		
	H _s	T _{e, hwa}	T _{e, qui}	H _s	T _{e, hwa}	T _{e, qui}	H _s	T _{e, hwa}	T _{e, qui}	H _s	T _{e, hwa}	T _{e, qui}
Bias	-0,16	0,09	-0,20	0,46	1,86	1,51	-0,15	0,10	-0,04	-0,15	-0,18	-0,38
RMSE	0,31	0,68	0,70	0,59	2,22	1,95	0,34	1,94	1,53	0,54	1,32	1,26
$\sigma_{rea}/\sigma_{sat}$	1,09	1,14	1,07	0,66	0,72	0,68	1,13	1,72	1,36	1,17	1,16	1,05
R	0,68	0,61	0,59	0,65	0,53	0,50	0,86	0,40	0,46	0,78	0,62	0,63
SI	0,17	0,09	0,09	0,26	0,19	0,19	0,16	0,23	0,18	0,23	0,16	0,14

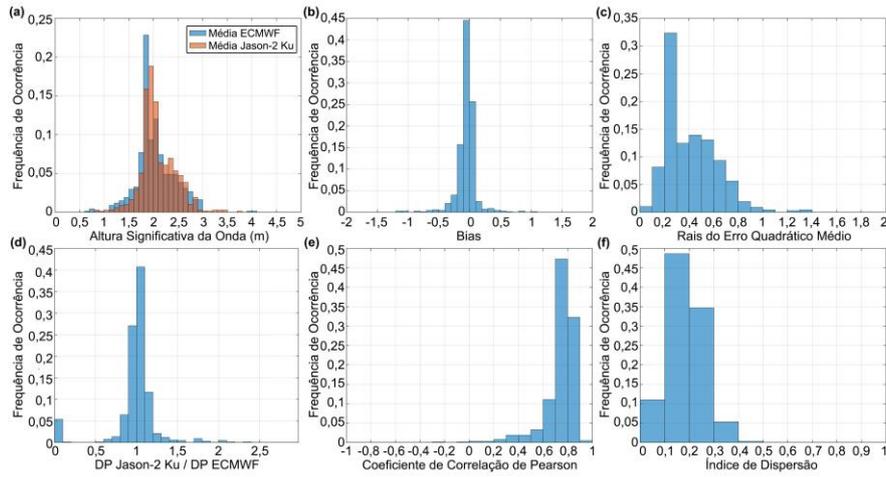


Figura 2 - Frequência de ocorrência dos valores de (a) média e dos parâmetros estatísticos (b) bias, (c) RMSE, (d) razão entre desvios-padrão, (e) coeficiente de correlação de Pearson e (f) índice de dispersão na análise entre as alturas significativas do ERA-Interim e do Jason-2/OSTM para os 632 pontos da região de estudo entre julho de 2008 e novembro de 2014.

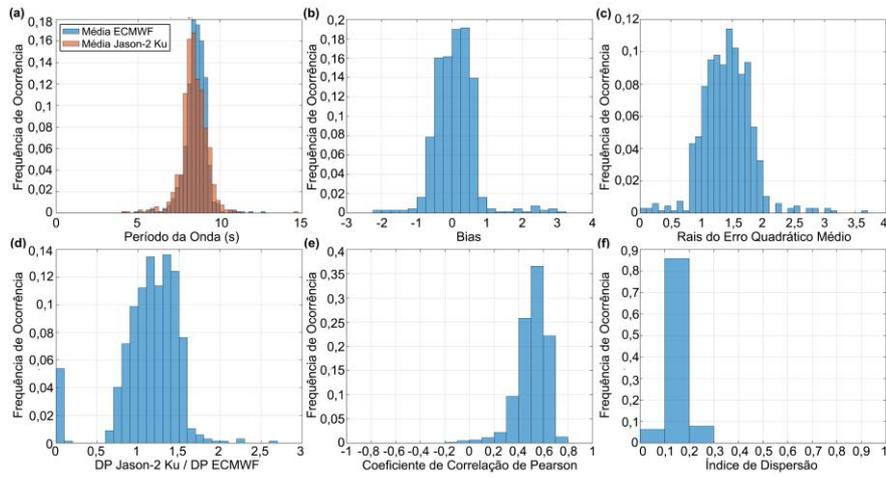


Figura 3 - Frequência de ocorrência dos valores de (a) média e dos parâmetros estatísticos (b) bias, (c) RMSE, (d) razão entre desvios-padrão, (e) coeficiente de correlação de Pearson e (f) índice de dispersão na análise entre os períodos do ERA-Interim e do calculado pelo método de Hwang et al. para os 632 pontos da região de estudo entre julho de 2008 e novembro de 2014.

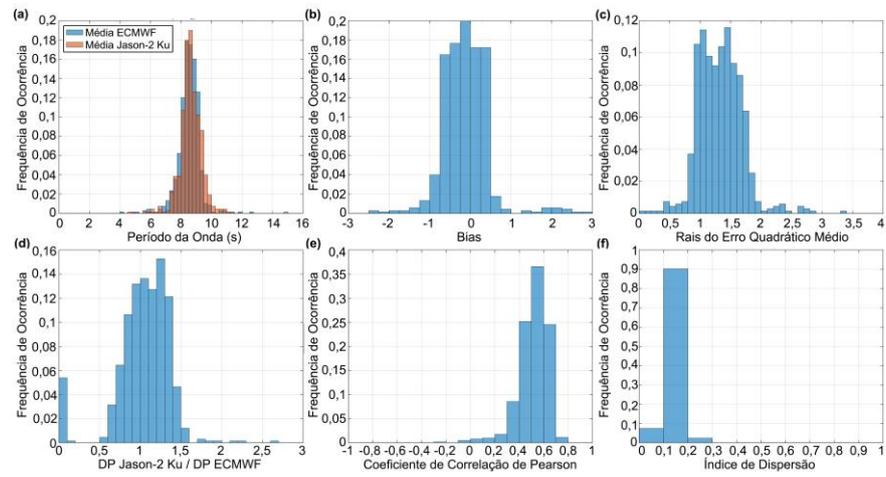


Figura 4 - Frequência de ocorrência dos valores de (a) média e dos parâmetros estatísticos (b) bias, (c) RMSE, (d) razão entre desvios-padrão, (e) coeficiente de correlação de Pearson e (f) índice de dispersão na análise entre os períodos do ERA-Interim e do calculado pelo método de Quilfen et al. para os 632 pontos da região de estudo entre julho de 2008 e novembro de 2014.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados da análise estatística pode-se concluir que os dados de altura significativa de reanálise do projeto ERA-Interim apresentam uma boa correlação em relação aos obtidos por medição indireta por meio do satélite de altimetria Jason-2/OSTM. Conclui-se também que estatisticamente não se pode afirmar nada com relação ao período da onda. Porém, existe uma similaridade qualitativa entre a tendência das duas séries de dados. Além disso, ambos os métodos utilizados para a estimativa do período da onda apresentaram resultados bastante semelhantes, indicando a possibilidade da utilização de ambos.

A utilização de mais de um satélite resolveria em parte, ou completamente, os lapsos de dados que a utilização de apenas um satélite gera. Isso permitiria uma cobertura espacial maior e conseqüentemente uma análise mais completa da região. Entretanto, a deficiência em fornecer dados de direção e período, ou de permitir estimativas precisas destes, são um empecilho na sua utilização para fins de cálculo direto da potência da onda. Esse fato, torna os dados de reanálise ideais para estimativas iniciais da potência de onda disponível no litoral brasileiro.

Percebe-se ainda, a partir dos resultados, que a costa brasileira apresenta valores baixos de altura de onda e período, principalmente em comparação ao mar europeu. Entretanto, nota-se que não há um espalhamento da distribuição de frequência. Esse fato pode ser vantajoso no que diz respeito ao aproveitamento da energia, por permitir o desenvolvimento de equipamentos menos robustos, já que não terão que enfrentar mares tão agitados.

Pretende-se, a partir dos resultados apresentados, realizar uma análise do clima de ondas da costa brasileira e estimar a potência das ondas. Em seguida, pretende-se identificar os locais mais adequados para aproveitamento da energia e baseado nas suas características locais, qual o tipo de conversor mais adequado.

Agradecimentos

Os autores agradecem os apoios financeiros concedidos pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

REFERÊNCIAS

- Aoun, N. S., Harajli, H. A., Queffeuou, P., 2013. Preliminary appraisal of wave power prospects in Lebanon, *Renewable Energy*, vol. 53, pp. 165-173.
- Arinaga, R. A., Cheung, K. F., 2012. Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data, *Renewable Energy*, vol. 39, pp. 49-64.
- Aydogan, B., Ayat, B., Yüksel, Y., 2013. Black Sea wave energy atlas from 13 years hindcasted wave data, *Renewable Energy*, vol. 57, pp. 436-447.
- Behrens, S., Hayward, J., Hemer, M., Osman, P., 2012. Assessing the wave energy converter potential for Australian coastal regions, *Renewable Energy*, vol. 43, pp. 201-217.
- Caires, S., Sterl, A., 2001. Comparative assessment of ERA-40 ocean wave product, *Proceedings of the ECMWF Workshop on Re-analysis, ERA-40 Proj. Rep. Ser., Eur. Cent. for Medium- Range Weather Forecasts, Reading, UK*, vol. 3, pp. 357- 372.
- Carvalho, J. T., 2010. Distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral do Brasil. Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos.
- Challenor P. G., Srokosz M. A., 1984. Extraction of wave period from altimeter data, *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*, pp. 121-124.
- Challenor, P. G. et al., 2006. Satellite altimetry: A revolution in understanding the wave climate, *European Space Agency, (Special Publication) ESA SP*, nº 614.
- Coli, A. B., Mata, M. M., 1996. Caracterização das alturas de onda no Atlântico Sul Ocidental através da altimetria TOPEX/POSEIDON, *Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, Salvador, Bahia*, pp. 755-760.
- Cruz, J. M., 2008 *Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives*, Berlim: Springer.
- Cruz, J. M., Sarmiento, A. J., 2004. Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais, Instituto do Ambiente Alfragide, Portugal.
- Davies, C. G., Peter, G. C., Cotton, P. D., 2001. Measurements of wave period from radar altimeters, *Proceeding of the International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, San Francisco*, pp. 819-826.
- Dee, et al., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 137, n. 656, Part A, pp. 553-597.
- Ebuchi, N., Kawamura, H., 1994. Validation of wind speeds and significant wave heights observed by the TOPEX altimeter around Japan, *Journal of Oceanography*, vol. 50, pp. 479-487.
- Estefen S. F. et al., 2003. Energia das ondas, in: Tolmasquim, M. T. (Org.) *Fontes renováveis de energia no Brasil*, Interciência, Rio de Janeiro.
- Gommengiger, C. P., Srokosz, M.A., Challenor, P.G., Cotton, P. D., 2003. An empirical model to retrieving ocean wave period from Nadir altimeter data. *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS 2003, Toulouse, France*, pp. 2706-2708.

- Gonçalves, M., Martinho, P., Guedes Soares, C., 2014. Wave energy conditions in the western French coast, *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 155-163.
- Gonçalves, W. M., Feijó, F. T., Abdallah, P. R., 2008. Energia de ondas: aspectos tecnológicos e econômicos e perspectivas de aproveitamento no Brasil, III Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica – SEMENG'08, Rio Grande.
- Govindan, R., Kumar, R., Basu, S., Sarkar, A., 2011. Altimeter-Derived Ocean Wave Period Using Genetic Algorithm, *Geoscience and Remote Sensing*, vol. 8, n. 2, pp. 354-358.
- Gower, J. F. R., 1996. Intercomparison of wave and wind data from TOPEX/POSEIDON, *J. Geophys. Res.*, vol. 101, pp. 3817-3829.
- Gunn, K.; Stock-Williams, C., 2012. Quantifying the global wave power resource, *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 296-304.
- Hiles, C. E., Buckham, B. J., Wild, P., Robertson, B., 2014. Wave energy resources near Hot Springs Cove, Canada, *Renewable Energy*, vol. 71, pp. 598-608.
- Hwang, P. A., Teague, W. J., Jacob, G. A., Wang, D. W., 1998. A statistical comparison of wind speed, wave height, and wave period derived from satellite altimeters and ocean buoys in the Gulf of Mexico region, *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, n. C5, pp. 10451-10468.
- Kasiulis, E., Punys, P., Kofoed, J. P., 2015. Assessment of theoretical near-shore wave power potential along the Lithuanian coast of the Baltic Sea, *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 134-142.
- Kinsman, B., 1965. *Wind Waves: Their Generation and Propagation on the Ocean Surface*, 1ª. Ed, Englewoods Cliffs: Prentice Hall.
- Liang, B., Fan, F., Liu, F., Gao, S., Zuo, H., 2014. 22-Year wave energy hindcast for the China East Adjacent Seas, *Renewable Energy*, vol. 71, pp. 200-207.
- Monaldo, F., 1988. Expected differences between buoy and radar altimeter estimates of wind speed and significant wave height and their implications on buoy-altimeter comparisons, *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, n. C3, pp. 2285-2302.
- Oliveira Filho, O. D. Q., 2011. Uma metodologia simplificada para estimativa do aproveitamento eólico offshore no litoral brasileiro – Estudo de caso: A ilha de Itamaracá/PE, Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFPE, Recife.
- Pimenta, F. et al., 2008. Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the offshore wind power resource of Southeastern Brazil, *Renewable Energy*, vol. 33, n. 11, pp. 2375-2387.
- Pond, S., Pickard, G., 1978. *Introductory Dynamical Oceanography*, 1ª. Ed, Oxford: Pergamon Press Ltd.
- Quilfen, Y., Chapron, B., Collard, F., Serre, M., 2004. Calibration/Validation of na altimeter wave period model and application to TOPEX/Poseidon and Jason-1 Altimeters, *Marine Geodesy*, vol. 27, n. 3-4, pp. 535-549.
- Ricarte, E., 2007. Avaliação de sítios para o aproveitamento dos recursos energéticos das ondas do mar, Tese de Doutorado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Ricarte, E. et al., 2005. Princípios para Implantação da Usina Piloto de Energia das Ondas e suas Aplicações, VIII Congresso Brasileiro de Defesa do Meio Ambiente, Rio de Janeiro.
- Robertson, B. R. D., Hiles, C. E., Buckham, B. J., 2014. Characterizing the near shore wave energy resource on the west coast of Vancouver Island, Canada, *Renewable Energy*, vol. 71, pp. 665-678.
- Souza, R. D. A., 2011. Escolha de Tecnologia de Conversão da Energia das Ondas em Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado, PPGEO, UFRG, Rio Grande.
- Vicinanza, D., Contestabile, P., Ferrante, V., 2013. Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy), *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 506-521.
- Zhao, D., Li, S., Song, C., 2012. The comparison of altimeter retrieval algorithms of the wind speed and the wave period. *Acta Oceanologica Sinica*, vol. 31, n. 3 pp. 1-9.
- Zodiatis, G. et al., 2014. Wave energy potential in the Eastern Mediterranean Levantine Basin. An integrated 10-year study, *Renewable Energy*, vol. 69, pp. 311-323.

VALIDATION OF ERA-INTERIM REANALYSIS WAVE DATA TO ESTIMATE THE WAVE POWER

Abstract. *This work is a validation effort of reanalysis data from ERA-Interim project needed to estimate the ocean wave power. To this end, statistical analyzes were performed, comparing them with data obtained from indirect measurement by satellite altimetry Jason-2/OSTM. Two different methods estimated the wave period once the altimeter satellites do not measure this data. As a result, a strong correlation was found, since in seven of eight points analyzed bias is kept below 0.16, and Pearson coefficient close to or greater than 0.7. The other statistical parameters also showed good results, such as scatter index always less than 0.25, RMSE generally low and the ratio of standard deviations close to 1. With respect to the wave period, the results were not conclusive, but the qualitative analysis indicates a trend between the data series.*

Key words: *Validation, Significant Wave Height, Wave Period*