

ANÁLISE COMPARATIVA BIDIMENSIONAL DOS MODELOS MARQUES E JONSWAP NA SIMULAÇÃO DE ONDAS NO RESERVATÓRIO DE ITAIPU

*Marcelo Marques¹, Fernando O. de Andrade², Adalberto K. Takeda³, Elaine P. Arantes⁴,
Cristhiane M. P. Okawa⁴, Otávio Medeiros Sobrinho⁵, Maria Júlia Bonfim Santana⁶,
Isabela Arantes Ferreira⁷*

Resumo – O presente trabalho visa apresentar uma análise comparativa bidimensional entre os modelos MARQUES e JONSWAP, com base em ventos severos com tempo de recorrência de 10, 20, 50 e 100 anos, de acordo com dados disponibilizados pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). É analisado o reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu – Paraná, localizado no Rio Paraná. Através da utilização do modelo ONDACAD foram determinados os campos de fetch e a transformação em campos de ondas pela utilização dos modelos paramétricos MARQUES e JONSWAP. Ao proceder a análise constatou-se que, ao majorar os resultados do modelo JONSWAP em 78% chega-se aos resultados bidimensionais gerados pelo modelo Marques. Esta condição foi verificada para situações de ventos extremos, ou seja, superiores a 20ms^{-1} e corpos hídricos que possuem fetch máximo da ordem de 10 quilômetros.

Palavras-Chave – ONDACAD; SWAN; fetch.

BIDIMENSIONAL COMPARATIVE ANALYSIS OF MARQUES AND JONSWAP MODELS IN WIND WAVE SIMULATION AT ITAIPU RESERVOIR

Abstract – The present work aims to present a two-dimensional comparative analysis between the MARQUES and JONSWAP models, based on severe winds with a recurrence time of 10, 20, 50 and 100 years, according to data provided by the Paraná Meteorological System (SIMEPAR). The reservoir of the Itaipu, located on the Paraná River, is analyzed. Using the ONDACAD model, the fetch fields were transformed in wave field by using the MARQUES and JONSWAP models. When the analysis was carried out, it was verified that, by increasing the results of the JONSWAP model by 78%, we arrive at the two-dimensional results generated by the Marques model. This condition was verified for situations of extreme winds, that is, superior to 20ms^{-1} and water bodies that have maximum fetch of the order of 10 kilometers.

Keywords – ONDACAD; SWAN; fetch

INTRODUÇÃO

Lagos e reservatórios constituem-se em componentes indissociáveis da paisagem brasileira, presentes em todas as grandes bacias hidrográficas. A opção do Brasil pela hidroeletricidade e a crescente demanda de energia permitem antever que a ocupação de novas bacias hidrográficas ou sub-bacias por reservatórios será inevitável (Marques, 2013).

A grande superfície destes corpos hídricos e as perturbações geradas pela exposição ao vento favorece o surgimento de ondas progressivas. Ao se propagarem, as ondas podem induzir processos de mistura em toda coluna d'água tendendo a destruir a estratificação vertical favorecendo a criação de gradientes longitudinais e transversais mais intensos (Smith, 1994). Estudos em corpos hídricos desse tipo frequentemente demandam informações relacionadas à dinâmica da massa hídrica.

A modelagem numérica dos processos físicos constitui-se atualmente na técnica computacional mais confiável de simulação de ondas geradas pelo vento. A técnica simula a transferência de energia na interface da atmosfera com a água e o impacto dos fenômenos dissipativos na amplitude das ondas. No desenvolvimento da modelagem numérica se avançou para a simulação das ondas decorrentes de campos de ventos variáveis no espaço e no tempo, além da inclusão da variabilidade dos campos de pressão e da profundidade (Fernandez et al., 2014). Também houve avanços no desenvolvimento da modelagem das ondas influenciadas pelas marés e pelas forças de Coriolis devido à rotação planetária, e dos mecanismos de interação onda-onda.

Apesar do indiscutível aumento de precisão atingido pelos modelos numéricos de base física, os modelos paramétricos continuam sendo amplamente empregados, principalmente, pela impossibilidade, técnica ou financeira, de utilização de modelos numéricos de base física. Esse fato deve-se a duas características altamente desejáveis em qualquer método de estimativa, presente nos modelos paramétricos: a estruturação por um número reduzido de variáveis e o fornecimento de resultados de forma rápida. Apesar do aumento de robustez que torna os modelos numéricos físicos mais lentos, requerendo maiores recursos computacionais para assimilação de dados e processamento, a predominância das atenções voltadas ao desenvolvimento desses modelos deve-se, principalmente, à possibilidade de obtenção de resultados bidimensionais, automatizados e em tempo real, condicionados obviamente aos recursos financeiros disponíveis.

Visando a retomada da aplicação de equações paramétricas pela sua simplicidade de aplicação e demanda a uma quantidade reduzida de variáveis foi desenvolvida a técnica denominada Modelagem Paramétrica Bidimensional (MPB) por Marques (2013).

Trata-se de uma técnica de simulação de fenômenos gerados pelo vento em águas continentais de grande superfície como lagos e reservatórios, podendo ser aplicados também a baías e estuários confinados.

A técnica MPB permite a obtenção de resultados semelhantes aos gerados pelos modelos numéricos de base física, porém, sob processos elementares. Pela técnica, o conceito do campo de fetch pode ser transformado em um campo de ondas mediante o emprego de uma equação paramétrica que estabelece uma relação unívoca entre o fetch e a altura da onda, condicionada pela intensidade do vento.

Entre as vantagens da modelagem paramétrica bidimensional estão a geração de mapas com baixo tempo de processamento e a dependência somente da intensidade e direção do vento como principais forçantes do processo.

MODELOS MARQUES E JONSWAP

De acordo com Marques (2013) o projeto JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) consistiu em uma série de levantamentos de dados de ventos e ondas realizados no mar do Norte ao longo dos anos de 1968 e 1969, com o objetivo de melhor compreender o processo de formação das ondas pelo vento (Hasselmann et al., 1973; Hasselmann et al., 1976). A coleta de dados foi realizada ao longo de um trecho de 160 km a partir da costa a oeste da Dinamarca. Os resultados desse estudo foram utilizados para estabelecer equações de previsão de altura significativa e período de ondas considerando uma velocidade de vento constante e incluindo as limitações de pista e de duração para o desenvolvimento da onda.

O projeto JONSWAP deu origem a no modelo com a mesma denominação, o qual constitui-se em uma equação paramétrica amplamente difundida no meio técnico visando a simulação de altura de ondas. O modelo JONSWAP é expresso pela equação 1 e relacionada a altura significativa da onda (H_s), o fetch (F), a intensidade do vento a dez metros de altura (U_{10}) e a aceleração da gravidade (g).

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0,0016 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0.5} \quad (1)$$

Os termos gFU^I e gHU^I representam respectivamente os termos adimensionais de fetch (F^*) e altura de onda (H^*). Deste modo o modelo JONSWAP possui uma estrutura que pode ser generalizada pela equação seguinte:

$$H^* = \alpha (F^*)^\beta \quad (2)$$

Na qual os coeficientes α e β são constantes.

Através do trabalho de Marques (2013) foi determinada uma nova equação paramétrica a qual segue a topologia da equação 2, a qual vem sendo expressa a seguir:

$$\alpha = 0,09778 \left(e^{-\frac{U}{2,355503}} \right) + 0,0028 \quad (3)$$

$$\beta = 0,51148 - [0,66223 - (0,84304U)] \quad (4)$$

Note-se que, diferentemente do modelo JONSWAP e das demais equações paramétricas na literatura, o modelo MARQUES possui coeficientes α e β variáveis e condicionados pela intensidade do vento.

Uma discussão abrangente sobre a topologia de equações paramétricas deste tipo foi realizada por Marques et al. (2014).

O modelo Marques foi determinado pelo ajustes de curvas em um diagrama adimensional de fetch (F^*) versus altura adimensional de onda (H^*), baseando-se nas conclusões de Marques et al. (2014).ao afirmar que uma topologia de equação paramétrica mais confiável deve conter coeficientes condicionados pela intensidade do vento.

Os corpos hídricos foram modelados para campos de vento uniforme com intensidades de 5, 10, 15 e 20 ms^{-1} . Visando a obtenção de uma equação paramétrica abrangente, os coeficientes foram determinados para oito corpos hídricos, entre lagos e reservatórios, com comprimento de fetch máximo variando da ordem de um a duzentos e cinquenta quilômetros conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Reservatórios estudados na determinação da equação MARQUES

Corpo Hídrico	Resolução da malha (m)	Fetch máximo (km)
Vossoroca	15	1,150
Molinos	25	3,910
Salto Caxias	75	3,310
Jurumirim	200	9,300
Itaipu	300	12,900
Mangueira	250	23,900
Lago Superior	2000	253,100

Fonte: Marques (2013)

VENTOS EXTREMOS EM ITAIPU

Para estimar a magnitude e frequência dos vendavais no reservatório de Itaipu, localizado próximo à tríplice fronteira entre o Brasil, Paraguai e Argentina, foram analisados dados de rajadas provenientes de 26 estações meteorológicas Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR).

Os dados de vento foram baseados no processamento das séries de vento horário de 1997 a 2005 (Gonçalves, 2007). Nestas estações, o vento horário é definido como a média dos dez registros

de vento medidos nos dez últimos segundos de cada hora. Os anemômetros constituem-se em equipamentos modelo YOUNG 05103-11, instalados a dez metros de altura. O percentual de falhas e dados espúrios foi de 2,8%.

Decidiu-se pela representação dos ventos severos sobre o Reservatório de Itaipu através de um processo de interpolação pelo inverso do quadrado das distâncias. A obtenção automatizada dos campos de vento relacionados a períodos de retorno foram obtidas pela aplicação do modelo computacional INTERPLOT apresentado por Marques et al., 2013. As intensidades do vento relacionadas a períodos de retorno para Itaipu estão descritas pela Tabela 2.

Tabela 2. Intensidades do vento relacionadoas a períodos de retorno no reservatório de Itaipu

Período de retorno do vento (anos)	U (m/s)
10	22,8
20	26,4
50	35,3
100	47,8

ÁREA DE ESTUDO

O reservatório de Itaipu (Figura 7) se localiza no rio Paraná e foi escolhido por sua importância energética e seu potencial para a expansão dos usos múltiplos, incluindo-se a aquicultura, lazer e navegação comercial. O limite sul é dado pela barragem de Itaipu, tendo o reservatório as seguintes características segundo Andrade et al., (2004): (1) Comprimento aproximado de 170 km e largura média de 7 km; (2) Área alagada de 1.350 km² (770 km² em território Brasileiro e 580 km² em território Paraguai); (3) Profundidade média de 22 m, chegando a 170 m nas proximidades da barragem; (4) Área de drenagem de aproximadamente 820.000 km².

RESULTADOS OBTIDOS

A geração dos campos de fetch pelo modelo ONDACAD e altura de ondas pelo modelo SWAN permitiu a construção do diagrama adimensional mostrado por meio da Figura 1.

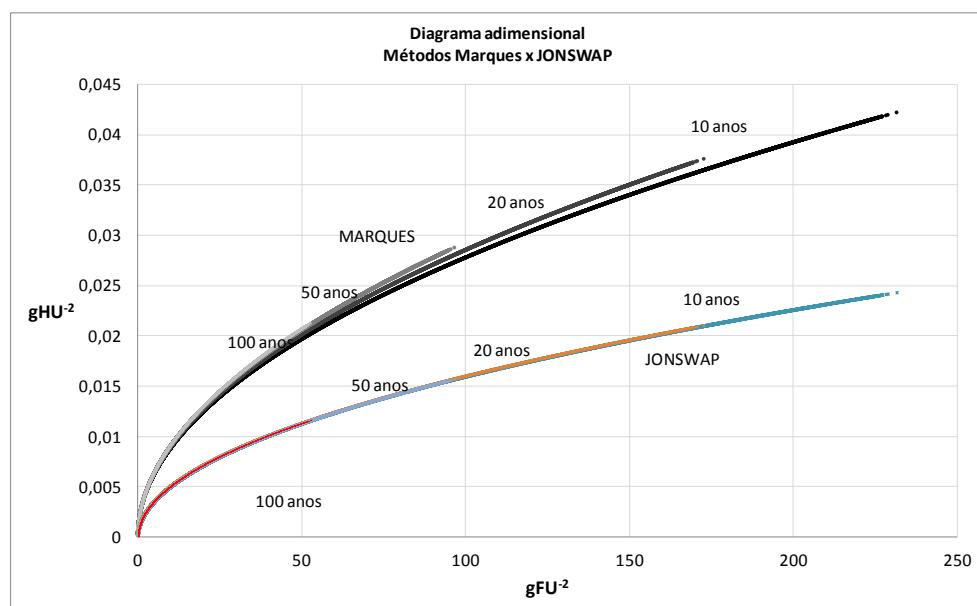


Figura 1 - Diagrama adimensional dos métodos Marques e JONSWAP para o reservatório de Itaipu

Pelo diagrama adimensional da Figura 1 nota-se que os métodos comparados permitem a obtenção de alturas de ondas bastante divergentes. De modo geral as alturas de ondas adimensionais determinadas pelo método Marques quase chegam ao dobro do tamanho das alturas geradas pelo método JONSWAP.

Os campos de ondas gerados pelos campos de vento uniformes são mostrados pela Figura 2 para ambos os métodos.

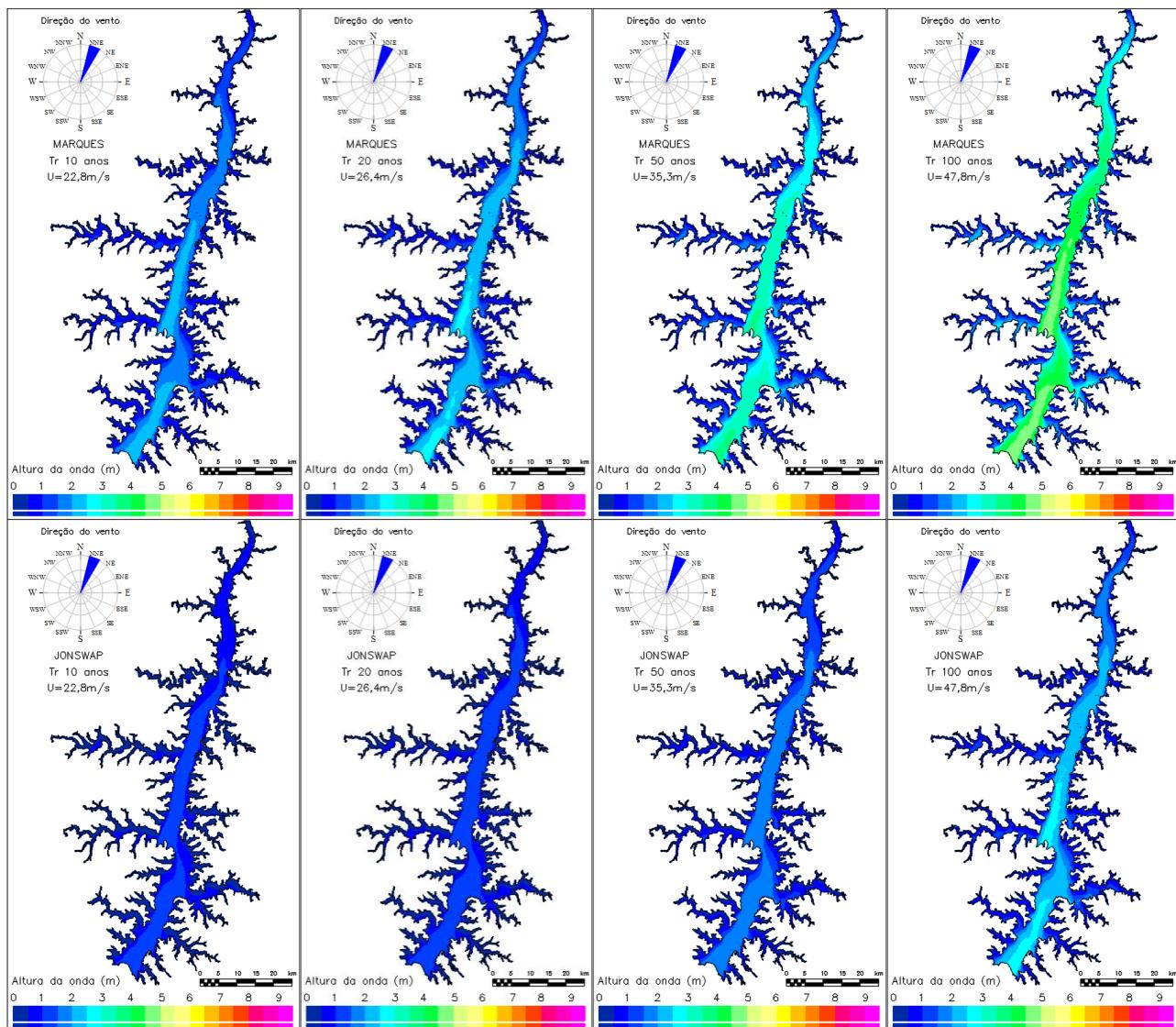


Figura 2 - Campos de ondas gerados pelos métodos MARQUES e JONSWAP para ventos de 10, 20, 50 e 100 anos de período de retorno

Observando a diferença acentuada entre os resultados e o aspecto semelhante das curvas, decidiu-se pela geração de mapas de desvio entre os resultados obtidos para cada método, para cada intensidade do vento, conforme Figura 3.

De acordo com a Figura 3, surpreendentemente a relação entre as alturas de ondas se aproximou de uma distribuição constante. Isto implica afirmar que deve haver uma constante que multiplicada pela equação de JONSWAP, permita a simulação de campos de ondas semelhantes aos obtidos pelo método MARQUES. Visando obter o valor desta constante decidiu-se por uma operação elementar de determinação da média dos valores distribuídos sob cada período de retorno do vento, com resultados mostrados pela Tabela 3.

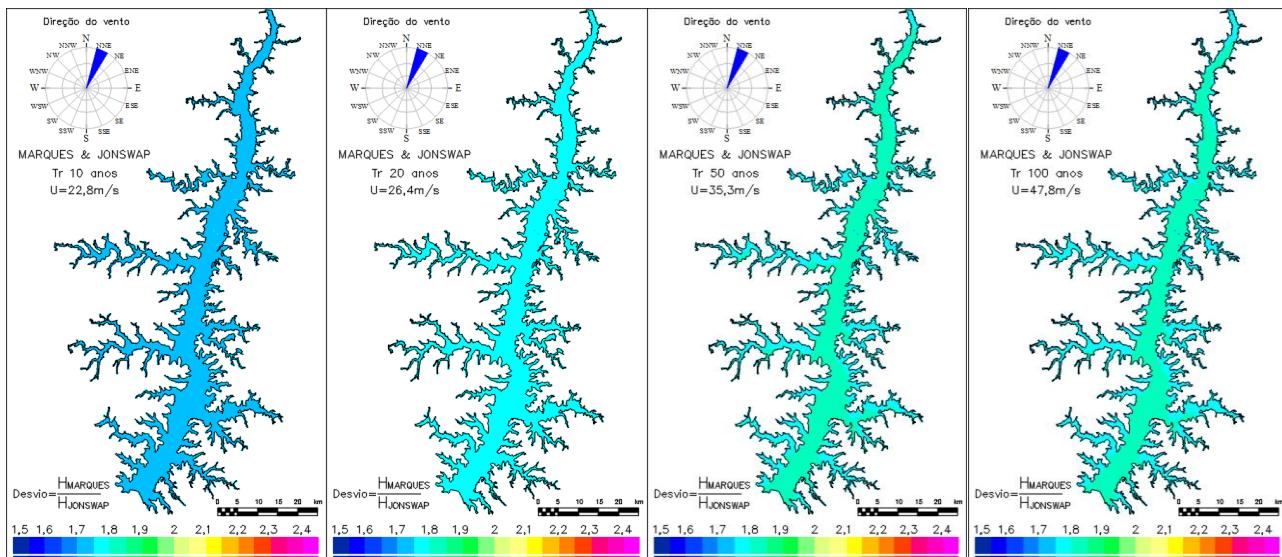


Figura 3 - Distribuição da razão entre as alturas de ondas dos métodos MARQUES e JONSWAP

Tabela 3. Determinação do coeficiente para modificação do modelo JONSWAP

Período de retorno do vento (anos)	$H_s^{\text{Marques}}/H_s^{\text{JONSWAP}}$	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
10	1,74	0,005	0,3
20	1,77	0,011	0,63
50	1,80	0,027	1,47
100	1,79	0,030	1,68
Média	1,78	0,018	1,02

Devido aos pequenos valores de coeficiente de variação, adotou-se o coeficiente 1,78. O modelo JONSWAP modificado é representado pela equação 5.e os resultados comparativos estão dispostos lado a lado na Figura 4.

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0,00285 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0,5} \quad (5)$$

Considerando a comparação entre os resultados apresentados pela Figura 12 constata-se que majorando os resultados do modelo JONSWAP em 78% atinge-se uma distribuição praticamente idêntica da obtida pelo modelo Marques. Deste modo, para ventos de intensidade superior a 20 ms^{-1} , em corpos hídrico que possuem fetch máximo da ordem de 10 quilômetros, pode-se empregar coeficientes alfa e beta constantes simplificando consideravelmente a equação paramétrica.

Revisando as equações paramétricas mais difundidas no técnico depara-se com uma equação semelhante ao modelo JONSWAP Modificado e consequentemente ao modelo Marques. Trata-se do modelo de Saville, uma equação paramétrica a coeficientes constantes desenvolvida por Saville *et al.* (1962), mostrada a seguir:

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0,0025 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0,47} \quad (6)$$

Estas semelhanças indicam uma convergência surpreendente entre os resultados de equação concebidas sob condições e recursos técnicos tão diversos.

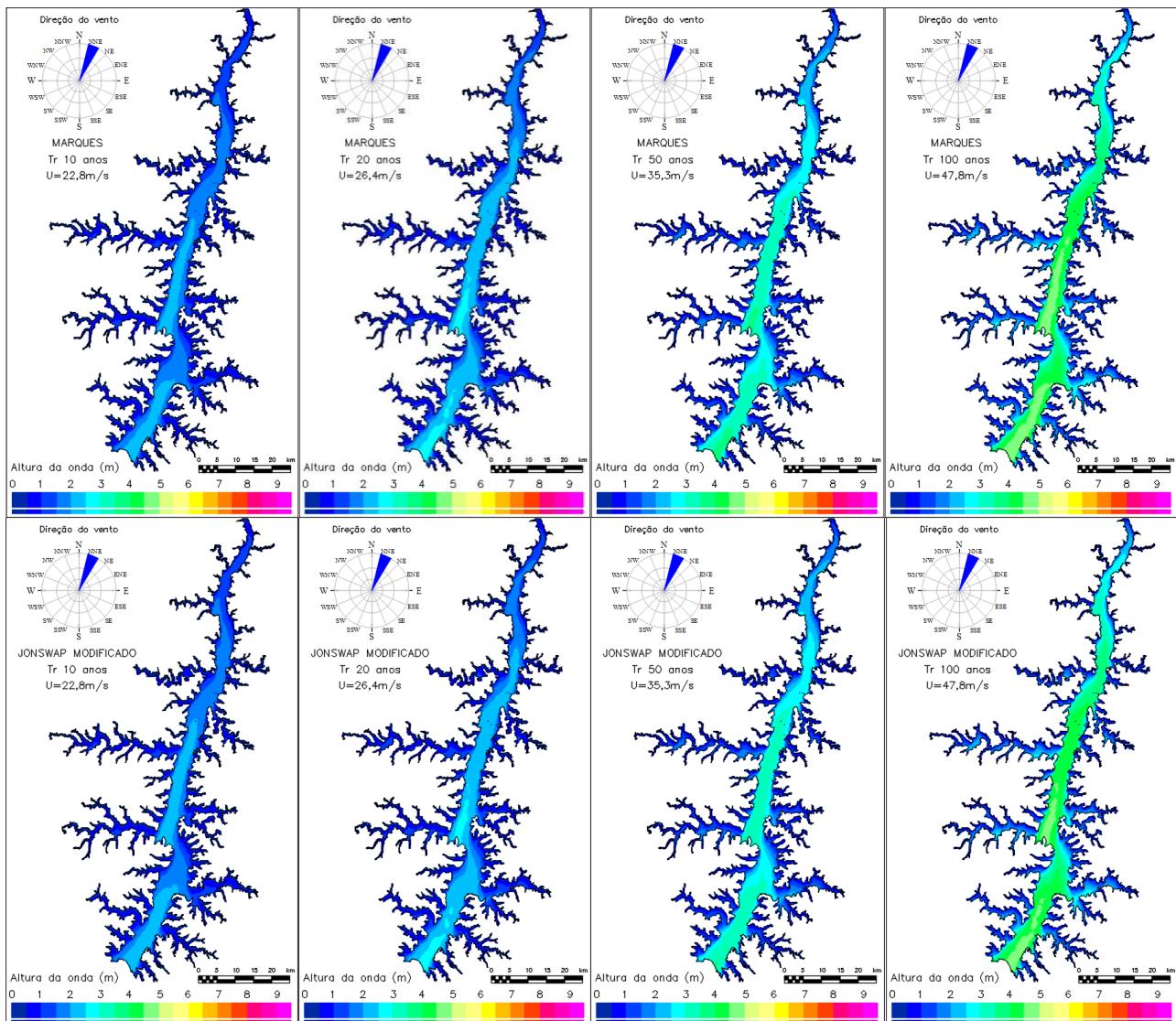


Figura 4 - Campos de ondas gerados pelos métodos Marques e JONSWAP Modificado

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo JONSWAP consiste em uma equação paramétrica de coeficientes constantes concebida em águas oceânicas ao longo dos anos de 1968 e 1969.

O modelo Marques se constitui em uma equação paramétrica de coeficientes variáveis, obtida com base em resultados de modernos modelos computacionais, amplamente validados no meio técnico.

Ao proceder a análise comparativa constatou-se que, ao majorar os resultados do modelo JONSWAP em 78% chega-se aos resultados bidimensionais gerados pelo modelo MARQUES. Esta condição foi verificada para situações de ventos extremos, ou seja, superiores a 20ms^{-1} e corpos hídricos que possuem fetch máximo da ordem de 10 quilômetros.

Esta constatação permite simplificar consideravelmente o modelo MARQUES quando o corpo hídrico atende às condições já citadas. Permite ainda o aproveitamento seguro de resultados publicados que adotaram o método JONSWAP nas estimativas de altura de ondas. Um importante desdobramento que pode ser empreendido por trabalhos futuros é a incorporação do modelo

paramétrico de Saville nas análises para corpos hídricos de diferentes magnitudes sob diferentes campos de vento.

REFERÊNCIAS

- Andrade F. O., Gonçalves, J. E., Gonçalves, R. C., GUETTER, A. K. 2004. Implementação e análise de sensibilidade do modelo numérico hidrodinâmico Delft-3D para o reservatório de Itaipu. In: XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. São Pedro/SP, Brasil, Out/2004.
- Gonçalves, C. R. 2007. Análise de Frequência Regional de Ventos Extremos no Paraná. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Grad. em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR.
- Hasselmann, K., ; Ross, D. B. ; Muller, P. ; Sell, W. 1976. A parametric wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 6(2), 200–228.
- Hasselmann, K.; Barnett, T. P. ; Bouws, E. ; Carlosn, H. ; Cartwright, D. E. ; Enke, K. ; Ewing, J. A. ; Gienapp, H. ; Hasselmann, D. E. ; Kruseman, P. ; Meerburg, A. ; Muller, P. ; Olbers, D. J. ; Richter, K. ; Sell, W. ; Walden, H. 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deut. Hydrogr. Z.*, A8(12).
- Marques, M. 2013. Modelagem paramétrica bidimensional para simulação de ondas em águas continentais. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 219p.
- Marques, M.; Andrade, F. O. ; Guetter, A. K. 2013. Conceito do Campo de Fetch e sua Aplicação ao Reservatório de Itaipu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, p. 243-253, 2013.
- Marques, M.; Andrade, F. O. 2017. Automated computation of two-dimensional fetch fields: case study of the Salto Caxias reservoir in southern Brazil. *Lake and Reservoir Management*, v. 32, p. 1-12, 2017.
- Marques, M.; Andrade, F. O.; Arantes, E. P.; Guetter, A. 2014. Proposta de topologia de uma equação paramétrica para modelagem de ondas baseada na equação do balanço de energia. In: XXVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Santiago, Chile, Agosto/2014.
- Marques, M.; Andrade, F. O.; Guetter, A. K. 2013. Conceito do Campo de fetch e sua Aplicação ao reservatório de Itaipu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, p. 243-253.
- Marques, M.; Maciel, G. F. ; Dall'Aglio Sobrinho, M. 2007. Estimativa das máximas pistas de vento no reservatório da barragem de Ilha Solteira - Estado de São Paulo -. *Acta Scientiarum. Technology* (Impresso), v. v. 29, p. 79-84, 2007.
- Saville, T. ; McClendon, E. W. ; Cochran, A. L. 1962. Freeboard allowances for waves in inland reservoirs. *ASCE Journal of the Waterways and Harbors Division*, V. 88(WW2): 93-124.
- Saville, T.. 1954. The effect of fetch width on wave generation. *Technical Memorandum No. 70*, U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 9 pp