

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 04/03/2025.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GERMANO DE OLIVEIRA MATTOSINHO

**MODELO SWAN E METAMODELAGEM APLICADOS NO ESTUDO DE ONDAS
GERADAS POR VENTO NO RESERVATÓRIO DE ILHA SOLTEIRA**

Ilha Solteira - SP
2024

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GERMANO DE OLIVEIRA MATTOSINHO

**MODELO SWAN E METAMODELAGEM APLICADOS NO ESTUDO DE ONDAS
GERADAS POR VENTO NO RESERVATÓRIO DE ILHA SOLTEIRA**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Ciências Térmicas, com ênfase em Mecânica dos Fluidos.

Prof. Dr. Geraldo de Freitas Maciel
Orientador

Profa. Dra. Fabiana de Oliveira Ferreira
Coorientadora

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Mattosinho, Germano de Oliveira.

M444m Modelo SWAN e metamodelagem aplicados no estudo de ondas geradas por vento no reservatório de Ilha Solteira / Germano de Oliveira Mattosinho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
154 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2024

Orientador: Geraldo de Freitas Maciel
Co-orientador: Fabiana de Oliveira Ferreira
Inclui bibliografia

1. Ondas geradas por ventos. 2. Modelagem de ondas. 3. Modelo SWAN. 4. Metamodelagem. 5. Índices de sobol. 6. Quantificação de incertezas.


Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O objetivo principal desta pesquisa é analisar um tema relevante, porém pouco explorado: a hidrodinâmica em recintos fechados. Por meio da utilização de modelagem numérica, metamodelagem (modelo simplificado ou abstrato que descreve o comportamento das ondas geradas por ventos, utilizando parâmetros e relações extraídos de modelos mais complexos ou de dados empíricos) e quantificação de incertezas, o propósito é gerar suporte fundamental para análises aprimoradas em projetos futuros destinados à implementação em reservatórios de barragens. Esses projetos estão especificamente focados em abordar preocupações relacionadas à segurança na navegação em trechos de hidrovias, proteção ambiental, preservação de margens e atividades de piscicultura. A integração dessas metodologias espera contribuir para uma compreensão mais precisa das dinâmicas complexas associadas a reservatórios de barragem.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The primary objective of this research is to scrutinize a pertinent yet underexplored subject: hydrodynamics in confined environments. Through the utilization of numerical modeling, metamodeling (simplified or abstract model that describes the behavior of wind waves, using parameters and relationships extracted from more complex models or empirical data, and uncertainty quantification, the aim is to generate foundational support for enhanced analyses in forthcoming projects intended for implementation in dam reservoirs. These projects are specifically focused on addressing concerns related to navigation safety in waterway sections, environmental safeguarding, preservation of shorelines, and pisciculture activities. The integration of these methodologies is expected to contribute to a more precise understanding of the complex dynamics associated with dam reservoirs.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MODELO SWAN E METAMODELAGEM APLICADOS NA ANÁLISE DE PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS DE ONDAS GERADAS POR VENTO EM RESERVATÓRIOS DE BARRAGEM

AUTOR: GERMANO DE OLIVEIRA MATTOSINHO

ORIENTADOR: GERALDO DE FREITAS MACIEL

COORDINADORA: FABIANA DE OLIVEIRA FERREIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica, área: Ciências Térmicas pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **GERALDO DE FREITAS MACIEL**
Data: 18/07/2024 22:01:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GERALDO DE FREITAS MACIEL (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Profa. Dra. CONCEIÇÃO JUANA ESPINOSA MORAIS FORTES (Participação Virtual)
Departamento de Hidráulica e Ambiente / Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC (Portugal)

Prof. Dr. AMERICO BARBOSA DA CUNHA JUNIOR (Participação Virtual)
Instituto de Matemática Aplicada / Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Profa. Dra. PATRÍCIA DALSOGLIO GARCIA (Participação Virtual)
Departamento de Recursos Hídricos / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Profa. Dra. NATÁLIA LEMKE (Participação Virtual)
Instituto de Matemática, Estatística e Física / Universidade Federal do Rio Grande - FURG

Ilha Solteira, 04 de março de 2024

DEDICATÓRIA

Dedico esta Tese à minha família: aos meus pais, Luiz Celso Vianna Mattosinho (*in memoriam*) e Inez de Oliveira Mattosinho, ao meu irmão Rodrigo de Oliveira Mattosinho e sua esposa Camila André Fiorato e aos meus sobrinhos Luiz Celso Vianna Mattosinho Neto e Ana Catarina Fiorato Mattosinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que de forma singular me conduziu até aqui através das tormentas e bonanças.

À minha família, em especial aos meus pais, Luiz Celso (*in memoriam*) e Inez, meu irmão Rodrigo e minha cunhada Camila, por todo o suporte e apoio ao longo dessa jornada, sempre acreditando em meu potencial.

Ao professor Dr. Geraldo de Freitas Maciel, que me proporcionou realizar este trabalho, por toda a orientação ímpar que continuamente expande meus horizontes, e, principalmente, pelos conselhos e conversas particulares que levarei como experiência.

À professora Dra. Fabiana de Oliveira Ferreira, por me orientar, incentivar e motivar sempre.

Agradeço em especial meu amigo Yuri Taglieri São pelo apoio e companheirismo.

Ao pessoal integrante do Laboratório de Hidrologia e Hidrometria (LH²) da FEIS-UNESP.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil (básico e profissional) pelos ensinamentos, tanto teóricos, como práticos, passados ao longo da minha graduação, que me deram toda a base de conhecimento em Engenharia.

Aos professores do PPGEM, em especial aos membros do Conselho Acadêmico, por todos os ensinamentos e compartilhamento de experiências que fazem parte da minha formação.

A todos os funcionários, principalmente aos técnico-administrativos pela presteza e auxílios, e em especial aos pertencentes à Seção de Pós-Graduação.

Ao apoio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Câmpus Avançado Piumhi no desenvolvimento deste trabalho.

A Banca examinadora por aceitar contribuir e participar deste momento tão importante da minha vida.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.” (Theodore Roosevelt).

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.” (Walter S. Landor).

“Gostaria que você soubesse que existe dentro de si uma força capaz de mudar sua vida. Basta que lute e aguarde um novo amanhecer.” (Margaret Thatcher).

RESUMO

A tese propõe uma abordagem abrangente para o estudo de ondas geradas por vento em reservatórios de barragens, tratando especificamente ondas no reservatório da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira. O trabalho integra medições em campo, modelagem numérica determinística e metamodelagem na abordagem probabilística, com vistas à análise mais detalhada dos processos de geração e propagação das ondas no reservatório. Destaca-se a relevância do estudo, considerando os impactos econômicos e de segurança relacionados às ondas em grandes reservatórios. O diagnóstico dos parâmetros significativos no processo de geração e propagação das ondas é executado a partir do modelo numérico SWAN. A metodologia adotada inclui, na sua etapa determinística, a calibração e validação do modelo e análise estatística, e na etapa probabilista aplicação do método de Monte-Carlo, análise de convergência amostral, entre outros, para determinação de índices de Sobol. Para a vertente probabilística é empregada a metamodelagem com PCE (*Polynomial Chaos Expansion*) calibrado e validado e análise de sensibilidade global por índices de Sobol. Os dados de vento e alturas de onda coletados no Projeto ONDISA (janeiro de 2011) foram utilizados. Os resultados obtidos, ainda que sobre base escassa de dados coletados, apontam avanços significativos na calibração do modelo SWAN para o caso de Ilha Solteira, destacando a importância dos parâmetros físicos, como o *whitecapping*, na modelagem das ondas. Já na vertente probabilística, a partir dos índices de Sobol de 1ª e 2ª ordens, a pesquisa confirma o elevado peso da intensidade e direção do vento na determinação das alturas significativas, seguido do efeito de *whitecapping*. Mapas de contorno para altura significativa e período médio de onda foram gerados a partir dos resultados numéricos, que servirá como apoio para aplicação prática em anteprojetos (piscicultura, proteção ambiental) no reservatório e seu entorno. Comparado a estudos anteriores, este trabalho contribui à compreensão da hidrodinâmica de ondas geradas por vento em recinto fechado, nas vertentes determinística e probabilística, com índices de concordância de 82% e desempenho de 67% em relação a dados de campo, em situação crítica de escassez de dados monitorados.

Palavras-chave: ondas geradas por ventos; altura significativa de onda; reservatórios de barragem; modelo SWAN; quantificação de incertezas; metamodelagem; índice de Sobol.

ABSTRACT

The thesis proposes a comprehensive approach to studying wind wave in dam reservoirs, specifically addressing waves in the reservoir of the Ilha Solteira Hydroelectric Power Plant. The work integrates field measurements, deterministic numerical modeling, and metamodeling in a probabilistic approach to provide a more detailed analysis of wave generation and propagation processes in the reservoir. Emphasis is placed on the relevance of the study, considering the economic and safety impacts related to waves in large reservoirs. The diagnosis of significant parameters in the wave generation and propagation process is performed using the SWAN numerical model. The adopted methodology includes, in its deterministic stage, model calibration and validation, statistical analysis, and in the probabilistic stage, the application of the Monte Carlo method, sample convergence analysis, among others, to determine Sobol indices. For the probabilistic aspect, metamodeling with Polynomial Chaos Expansion (PCE), calibrated and validated, is employed alongside global sensitivity analysis using Sobol indices. Wind and wave height data collected in the ONDISA Project (January 2011) were utilized. The obtained results, although based on a limited dataset, show significant advancements in calibrating the SWAN model for the Ilha Solteira case, highlighting the importance of physical parameters such as whitecapping in wave modeling. In the probabilistic aspect, based on first and second-order Sobol indices, the research confirms the high influence of wind intensity and direction on determining significant wave heights, followed by the whitecapping effect. Contour maps for significant wave height and mean wave period were generated from numerical results, serving as support for practical applications in preliminary designs (fish farming, environmental protection) within the reservoir and its surroundings. Compared to previous studies, this work contributes to understanding the hydrodynamics of wind-generated waves in enclosed basins, both in deterministic and probabilistic aspects, with agreement indices of 82% and a performance of 67% concerning field data, particularly in critically scarce monitored data situations.

Keywords: wind waves; significant wave height; dam reservoirs; SWAN model; uncertainty quantification; metamodeling; Sobol index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da Lagoa dos Patos/RS.....	22
Figura 2 – Barragem da Usina Hidrelétrica Ilha Solteira (UHE Ilha Solteira) no rio Paraná na divisa entre Ilha Solteira (SP) e Selvíria (MS).....	24
Figura 3 – Estrutura geral da aplicação de Quantificação de Incertezas	46
Figura 4 – Trecho da hidrovía Tietê-Paraná no reservatório da barragem de Ilha Solteira - SP, com nome dos rios, dos Estados e pontos de interesse. A linha laranja indica o percurso da hidrovía.....	55
Figura 5 – Gráfico representativo das ocorrências de alturas significativas (2010-2011) coletadas na estação de monitoramento.....	56
Figura 6 – Ocorrências das direções dos ventos (out/2010 a mar/2011) coletadas na estação de monitoramento	57
Figura 7 – Representação em planta da batimetria do lago de Ilha Solteira/SP	57
Figura 8 – Árvore de instrumentação no lago da barragem de Ilha Solteira	59
Figura 9 – Rosa dos ventos do mês de janeiro com médias horárias dos dados de vento (710 dados)	60
Figura 10 – Fluxograma sintético da vertente determinística	60
Figura 11 – Representação gráfica 3D da batimetria do Lago de Ilha Solteira (unidade de medida [m])	62
Figura 12 – Exibição da batimetria completa e do contorno da malha no Aquaveo SMS 10	64
Figura 13 – Croqui dos pontos da fase exploratória (<i>Google Satellite</i>)	65
Figura 14 – Fluxograma sintético da vertente probabilística	76
Figura 15 – Comparativo entre os casos: referência ($cd = 0,038$), com <i>whitecapping</i> desativado e com coeficiente de atrito de fundo de JONSWAP (cd) igual a 0,067, para intensidade do vento igual a 5 m.s^{-1}	81
Figura 16 – Comparativo entre os casos: referência, com <i>whitecapping</i> desativado e com coeficiente de atrito de fundo de JONSWAP igual a 0,067, para intensidade do vento igual a 10 m.s^{-1}	82
Figura 17 – Comparativo entre o caso referência, com <i>whitecapping</i> desativado e com coeficiente de atrito de fundo de JONSWAP igual a 0,067, para intensidade do vento igual a 15 m.s^{-1}	83

Figura 18 – Comparativo entre os casos: referência, com <i>whitecapping</i> desativado e com coeficiente de atrito de fundo de JONSWAP igual a 0,067, para intensidade do vento igual a 20 m.s ⁻¹	84
Figura 19 – Comparativo entre os casos: referência e com difração desligada para intensidade do vento igual a 20 m.s ⁻¹	85
Figura 20 – Comparativo entre os casos: referência, com <i>whitecapping</i> desativado, com coeficiente de atrito de fundo de JONSWAP igual a 0,067 e com a quebra de ondas induzida pela profundidade desativada, para intensidade do vento igual a 20 m.s ⁻¹	86
Figura 21 – Comparativo entre os casos: referência e com a quebra de ondas induzida pela profundidade desativada em batimetria real e os mesmos casos para batimetria com profundidade constante de 2 m para intensidade do vento igual a 20 m.s ⁻¹	87
Figura 22 – Curvas de dissipação de energia total (DISSIP) e por atrito de fundo (<i>Sfric</i>) para os casos C1 e C5 com velocidade do vento de 20 m.s ⁻¹	88
Figura 23 – Curvas de dissipação de energia total (DISSIP), por atrito de fundo (<i>Sfric</i>), por quebra de ondas (<i>Ssurf</i>) e por <i>whitecapping</i> (<i>Swcap</i>) para os casos C1 e C5 com velocidade do vento de 20 m.s ⁻¹	89
Figura 24 – Curvas de dissipação de energia total (DISSIP) e por <i>whitecapping</i> (<i>Swcap</i>) para o caso C1 com velocidades do vento de 5,0, 10,0, 15,0 e 20 m.s ⁻¹	90
Figura 25 – Comparativo entre o caso referência com equação de atrito de fundo de “FRIC KOM” (padrão), “FRIC RIP”, “FRIC COLL” e “FRIC MAD”, para intensidade do vento igual a 15 m.s ⁻¹ e 20 m.s ⁻¹	91
Figura 26 – Comparativo entre as formulações de <i>whitecapping</i> em relação a <i>Hs</i>	92
Figura 27 – Gráficos de <i>Hs</i> × <i>Dados</i> para conjunto de dados de minuto a minuto (min) e em médias horárias (hora) para o ponto da estação de monitoramento	94
Figura 28 – Gráficos de <i>Hs</i> × <i>Dados</i> (dados de vento em médias horárias) para as malhas de 1000 m, 250 m, 150 m e 100 m de resolução, respectivamente	94
Figura 29 – Gráficos de <i>Hs</i> × <i>Dados</i> para o caso padrão e caso com atrito de fundo da eq. de Madsen, respectivamente	97
Figura 30 – Gráficos de <i>Hs</i> × <i>Dados</i> para todos os casos, caso padrão, caso “WU” e caso “SWELL”, respectivamente	98
Figura 31 – Gráficos de <i>Hs</i> × <i>Dados</i> para todos os casos, caso “KOM” (padrão), caso “JANS”, caso “LHIG” e caso “AB”, respectivamente	101

Figura 32 – Gráficos de $H_s \times \text{Dados}$ para todos os casos com exceção do caso “WESTH”, caso “KOM” (padrão), caso “JANS”, e caso “WESTH”, respectivamente	104
Figura 33 – Gráfico de H_s em função da velocidade do vento para o conjunto de dados	107
Figura 34 – Gráfico de porcentagem de ocorrência de direção média de propagação de ondas dispostos em 16 intervalos para o conjunto de dados do sensor	107
Figura 35 – Gráfico de porcentagem de ocorrência de direção de pico de propagação de ondas dispostos em 16 intervalos para o conjunto de dados do sensor	108
Figura 36 – Gráfico de período médio absoluto de propagação de ondas dispostos para o conjunto de dados	108
Figura 37 – Gráfico de período de pico do espectro de densidade de variância (espectro de frequência relativa) para o conjunto de dados	109
Figura 38 – Gráficos de distribuição de probabilidade e frequência para velocidade do vento utilizando dados de campo de outubro de 2010 a março de 2011 (base de dados do Projeto ONDISA)	110
Figura 39 – Gráfico dos resultados estatísticos para as amostras	112
Figura 40 – Gráfico dos erros de validação para as amostras	113
Figura 41 – Gráfico dos erros de validação para as amostras em função do grau polinomial	114
Figura 42 – Índices de Sobol de 1ª ordem e coeficientes de correção e determinação do PCE	114
Figura 43 – Histograma de saída verdadeira vs. previsão de PCE	116
Figura 44 – Índices de Sobol de 1ª e 2ª ordem e coeficientes de correção e determinação do PCE	116
Figura 45 – Coeficientes de correção e determinação do PCE	117
Figura 46 – Mapa de contorno de dados de vento em relação a H_s	118
Figura 47 – Mapa de contorno de dados de vento em relação ao período médio de onda [s]	118
Figura 48 – Histograma de saída verdadeira vs. previsão de PCE com dados de vento constantes	120
Figura 49 – Índices de Sobol de 1ª ordem e coeficientes de correção e determinação do PCE com dados de vento constantes	120
Figura 50 – Curvas de contorno de $H_s \times (T_m, V)$	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relevância dos processos durante a propagação da onda de águas profundas para águas rasas. Adaptado de Beji e Battjes (1994)	42
Tabela 2 – Nomenclatura dos pontos com suas coordenadas e profundidades considerando superfície livre na cota 323,18 m	66
Tabela 3 – Cálculos para discretização de incertezas pelo Método GCI	80
Tabela 4 – Dados estatísticos para as malhas de 1000 m, 250 m, 150 m e 100 m ..	96
Tabela 5 – Dados estatísticos para as formulações de campo de vento	100
Tabela 6 – Dados estatísticos para as formulações de <i>whitecapping</i>	103
Tabela 7 – Dados estatísticos para as formulações dos modelos de terceira geração (GEN3)	105
Tabela 8 – Suportes das variáveis aleatórias consideradas	112
Tabela 9 – Descrição estatística dos dados	121
Tabela 10 – Matriz de correlação de <i>Spearman</i>	122
Tabela 11 – Dados estatísticos do modelo de regressão multivariada	124

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características das malhas utilizadas.	64
Quadro 2 – Nomenclatura e características dos casos analisados	67

LISTA DE SÍMBOLOS

h_i [m]	resolução (<i>mesh</i>) da malha computacional
$\mathcal{M}_0$	constante e igual ao valor esperado do PCE
C_D	coeficiente de arrasto
CGI_{fine} [%]	índice de refinamento da malha de menor resolução
C_b [m ² .s ⁻³]	coeficiente de atrito de fundo (JONSWAP)
D_p [°]	direção de pico
L_0 [m]	comprimento de onda
L_0 [m]	comprimento de onda
R^2	índice de determinação
$S_{ds,b}$ [m ² .s ⁻¹]	termo dissipação por atrito de fundo
$S_{ds,br}$ [m ² .s ⁻¹]	termo de dissipação por quebra induzida de onda
$S_{ds,w}$ [m ² .s ⁻¹]	termo de dissipação por <i>whitecapping</i>
S_i	índices de Sobol de primeira ordem
S_{ij}	índices de Sobol de segunda ordem
S_{in} [m.s ⁻¹]	termo fonte (campo de velocidade)
S_{nl3} [m ² .s ⁻¹]	dissipação por interações triplas de ondas
S_{nl4} [m ² .s ⁻¹]	dissipação por interações quadruplas de ondas
S_{tot} [m ² .s ⁻¹]	termo fonte/sumidouro de energia de onda
e_a	erro relativo adimensional aproximado
e_{ext}	erro relativo extrapolado estimado
k_n	nº de parâmetros de entrada independentes do PCE
n_p	número de variáveis do PCE
$\mathcal{D}_X$	suporte do conjunto de entrada do PCE
c [m.s ⁻¹]	celeridade de onda
C1	referência. Modelo SWAN em condição padrão
C2	<i>whitecapping</i> desabilitado
C3	difração desabilitada
C4	difração desabilitada e atrito de fundo de JONSWAP, C_b , igual a 0,067
C5	difração e quebra induzida de ondas pela profundidade desabilitados

C_6	equação de atrito de fundo de Smith <i>et al.</i> (2011)
C_7	equação de atrito de fundo de Collins (1972)
C_8	equação de atrito de fundo de Madsen <i>et al.</i> (1988)
C_9	alteração do coeficiente de atrito de fundo de JONSWAP, C_b
$\mathcal{M}$	modelo matemático do PCE
$Bias$	desvio sistemático do valor real
Dir [°]	direção de propagação da onda
Dp [°]	direção de pico
E [m ² .s ⁻¹]	densidade de energia
F_s	fator de segurança para intervalo de confiança de 95%
H_s [m]	altura significativa de onda
IC	índice de concordância
ID	índice de dispersão
IP	índice de performance
N	densidade de ação do espectro de onda
N_p	número de coeficientes do PCE
R	coeficiente de Pearson (correlação)
$RMSE$	erro médio quadrático
Tp [s]	período de pico
X	vetor de entrada do PCE
Y	saída escalar do PCE
d [m]	profundidade local
p	grau do PCE
r	fator de refinamento de malha para cálculo GCI

LETRAS GREGAS

$\gamma_b = H_s/d$	Índice de rebentação ou quebra induzida de onda
a	razão da amplitude de onda
$k = 2\pi/\lambda$	número de onda
θ [°]	direção da onda
λ [m]	comprimento de onda
σ [Hz]	frequência relativa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	OBJETIVOS.....	27
1.1.1.	Geral.....	27
1.1.2	Específicos	27
1.2	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA.....	28
1.3	ESTRUTURAÇÃO DA TESE.....	29
2	ESTADO DA ARTE, DESCRIÇÃO DO MODELO SWAN E DA QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS	31
2.1.	MODELO SWAN	39
2.1.1	Descrição do modelo SWAN	41
2.2.	ASPECTOS GERAIS DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS.....	44
2.2.1	Princípio da Entropia Máxima	48
2.2.2	Métodos de Monte-Carlo × Quase-Monte Carlo	49
2.2.3	Metamodelagem em Expansão em Polinômio Caos (PCE) e Validação...50	
2.2.4	Índices de Sobol por meio de PCE	52
3	MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1.	METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DA BATIMETRIA (Vieira, 2013)	61
3.2	PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÃO DO SWAN	62
3.2.1	O uso dos Dados de Vento.....	62
3.2.2	Malhas computacionais e Batimetria	63
3.2.3	Modelo SWAN e Automação de Processos	64
3.3	ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICOS.....	70
3.4	ESTATÍSTICA PARA ANÁLISE DE DADOS	73
3.5	VERTENTE PROBABILÍSTICA – QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS	74
3.5.1	Modelagem em Expansão em Polinômio Caos	76
3.5.2	Análise de sensibilidade Global.....	77
3.6	MÉTODOS DE ANÁLISES DE RESULTADOS	78

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.1	ETAPA EXPLORATÓRIA	80
4.1.1	Análise de convergência de malhas pelo método GCI	80
4.1.2	Análises utilizando o modelo SWAN padrão, desligando o <i>whitecapping</i> e com variação do coeficiente de atrito de fundo	81
4.1.3	Análises sobre a influência da difração e quebra induzida de onda	85
4.1.4	Análises sobre dissipação de energia e suas componentes	87
4.1.5	Análises sobre dissipação de energia pelo atrito de fundo	90
4.1.6	Análises sobre dissipação de energia por distintas equações de <i>whitecapping</i>	91
4.2	ESTUDO DE CASOS DETERMINÍSTICOS	92
4.2.1	Execução do Modelo SWAN em modo estacionário padrão	93
4.2.2	Análise de equações de atrito no modelo SWAN	96
4.2.3	Análise de formulação para a velocidade do vento no modelo SWAN	98
4.2.4	Análise de equações de <i>whitecapping</i> no modelo SWAN	100
4.2.5	Análise de formulações de geração e propagação de ondas no modelo SWAN	103
4.2.6	Análise dos resultados de direções média, de pico e períodos médio e de pico na propagação de ondas	106
4.3	QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NO MODELO SWAN	109
4.3.1	Geração de variáveis aleatórias (suporte e distribuição)	110
4.3.2	Análise de convergência para determinação do tamanho amostral	112
4.3.3	Análise da influência do grau polinomial nos erros de validação do Polynomial Chaos Expansion (PCE)	113
4.3.4	Índices de Sobol para PCE com 3000 dados validado com amostra de 2000 dados	114
4.3.5	Validação do PCE com 3000 mil dados utilizando método 80/20 em conjunto com a técnica <i>bootstrap</i>	115
4.3.6	Mapas de contorno para H_s e Período de onda (T_{m01})	117
4.3.7	Criação e validação de PCE com velocidade e direção fixas	119
4.3.8	Análise estatística, matriz de correlação e equação adimensional	121
4.4	COMENTÁRIOS ACERCA DOS RESULTADOS	126
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	127

REFERÊNCIAS.....	132
APÊNDICE A – Modelo de executável (“.swn”)	142
APÊNDICE B – Código de automação em linguagem Python.....	143
APÊNDICE C – Dados do Projeto ONDISA tratados em médias horárias	148
APÊNDICE D – Imagem de sistematização para cálculo de GCI.....	154
PUBLICAÇÕES	155

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo aborda-se, de maneira geral, o modelo SWAN e um breve histórico dos estudos de hidrodinâmica em zonas costeiras e em ambientes confinados, como o lago de Ilha Solteira/SP, Brasil. Assim buscando familiarizar o leitor ao tema e relevância do trabalho em questão.

A análise da hidrodinâmica em reservatórios de barragem é um tema de crescente importância global, com implicações significativas para a segurança da navegação, a preservação ambiental e o planejamento de projetos, especialmente no contexto de usinas hidrelétricas. Embora a compreensão hidrodinâmica em ambientes abertos, como zonas costeiras, tenha sido extensivamente estudada, a investigação em recintos fechados, como reservatórios, ainda enfrenta desafios devido à escassez de dados de campo e na obtenção de banco de dados (p.e. ventos e batimetria) necessários à calibração e validação da modelagem numérica (Gruijthuisen, 1996; Booij *et al.*, 1996 e 1999; Mao *et al.*, 2016; Nikishova *et al.*, 2017; Lemke *et al.*, 2018; Marinho *et al.*, 2020; Mattosinho *et al.*, 2022; Alves *et al.*, 2022; Shu *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023; Sapiega, Zalewska, Struzik, 2023; Majidi *et al.*, 2023).

Em termos de simulação numérica, o modelo SWAN, de 3ª geração, (Booij *et al.*, 1996 e 1999), largamente difundido na literatura, tem sido amplamente aplicado e validado em áreas costeiras (abertas), estuarinas e semiconfinadas, com aplicação bem mais restrita a recintos fechados (Trovati, 2001 e 2011; Vieira, 2013; Mao *et al.*, 2016; Nikishova *et al.*, 2017; Marinho *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020; Mattosinho *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023; Alves *et al.*, 2022), como em reservatórios de barragens, especificamente no Brasil.

Vale lembrar que muitos dos aproveitamentos hidroelétricos do país datam dos anos 60/70, e os poucos modelos disponíveis à época eram de natureza semiempírica e/ou parametrizada. No contexto de águas confinadas, Gruijthuisen (1996) teria sido o pioneiro a utilizar e validar, a partir de medições de boias, o modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) no Lago George, Austrália. No Brasil, utilizando o modelo SWAN na Lagoa dos Patos/RS (Figura 1) pela primeira vez, s.m.j., os parâmetros das ondas foram modelados nos estudos conduzidos por Simão (2016) e Lemke *et al.* (2015).

Figura 1 – Localização da Lagoa dos Patos/RS



Fonte: Marinho *et al.* (2020).

Simão (2016) realizou a modelagem de ondas com base em 30 anos de dados de vento (de 1982 a 2012), obtendo resultados de altura significativa (H_s) e período de pico (T_p) para uma localização cerca de seis quilômetros distante de São Lourenço do Sul, onde a profundidade local é de três metros. Em geral, o autor observou maiores frequências de ondas com H_s de até 0,4 m e períodos de pico de até 2,5 s. Embora a localização de análise dos dados modelados não seja exatamente a mesma da boia de medição e o período de estudo (de 1982 a 2012 para a simulação e 2015, primeiro semestre, para as medições com a boia de medição de ondas) não seja o mesmo, os resultados são muito próximos, uma vez que os valores médios de H_s e T_p registrados pela boia de medição de ondas foram de 0,35 m e 2,78 s, respectivamente (Lemke *et al.*, 2017).

Assim como observou que os esporões são responsáveis por uma descontinuidade nos campos de ondas, de acordo com os estudos prévios de Toldo *et al.* (2006). Lemke *et al.* (2015) e Simão (2016) verificaram a calibração do modelo SWAN aplicado à Lagoa dos Patos/RS por meio da análise estatística entre os resultados numéricos e os dados observados medidos pelo ondógrafo direcional.

Lemke *et al.* (2015) afirmam que os resultados numéricos médios (0,50 m, 2,45 s e 75,83°, correspondentes a H_s , T_p e Dir , respectivamente) apresentaram um desempenho satisfatório para os três parâmetros de ondas analisados em relação aos resultados observados médios (0,57 m, 3,33 s e 105,75°, correspondentes a H_s , T_p e

Dir, respectivamente). Os autores notaram uma inclinação do modelo para subestimar os dados observados. Para validar a modelagem, utilizaram dados coletados em campo pelo ondógrafo Waverider Datawell Mark III, especialmente direcionado para monitorar a dinâmica na foz do Arroio Carahá.

O ondógrafo foi fundeado a partir de uma iniciativa da Comissão Intergovernamental de Oceanografia (IOC-UNESCO) coordenada pela Universidade Federal de Rio Grande, através do projeto “Rede Ondas, Rede de Monitoramento de Ondas em Águas Rasas” do Sistema de Observação do Oceano Global (GOOS/Brazil). Estudos mais recentes na região estão dispostos em Lemke *et al.* (2017, 2018), Lima *et al.* (2019), Marinho *et al.* (2020) e Lemke *et al.* (2021).

A hidrodinâmica em recintos fechados, como lagos de barragem, tem sido estudada por modelos de segunda e terceira geração, como ONDISAPy e SWAN respectivamente. No Brasil temos estudos envolvendo modelos de segunda geração, como ONDISACAD/ONDISAPy (desenvolvidos na Fac. Eng. de Ilha Solteira (FEIS) – UNESP), que utilizam de equações parametrizadas para obter as pistas de vento e simular ondas geradas por ventos nos reservatórios e lagos de interesse.

Dada a relevância da Hidrovia Tietê-Paraná na economia e sustentabilidade, a equipe do Projeto ONDISA (liderado pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Trovati, 2001, 2011 e 2015; Vieira, 2013; Mattosinho *et al.*, 2022) realizou trabalho de campo no reservatório da UHE Barragem Ilha Solteira (Figura 2), que contém um segmento da rota de navegação da Hidrovia Tietê-Paraná. Uma estação de monitoramento localizada à 300 m das margens da margem esquerda do reservatório coletou dados de velocidade e direção do vento, e diferença de pressão, que foi transformada em altura significativa de onda, durante o período de outubro de 2010 a março de 2011 (Trovati, 2011; Vieira, 2013).

Expedições em campo, como do Projeto ONDISA, são muito dispendiosas e complexas do ponto de vista logístico e metodológico, porém são essenciais para o avanço científico. Dada a limitação de novas expedições, a literatura utiliza modelos numéricos para replicar as condições observadas em campo. Após a calibragem e validação do modelo para o caso específico, pode-se simular novas situações preditivas para auxiliar na compreensão dos fenômenos envolvidos e seus efeitos.

Desde 2011 vem-se aplicando o modelo SWAN no lago de Ilha Solteira/SP buscando a calibração e validação para a zona em questão (Vieira, 2013).

Figura 2 – Barragem da Usina Hidrelétrica Ilha Solteira (UHE Ilha Solteira) no rio Paraná na divisa entre Ilha Solteira (SP) e Selvíria (MS)



Fonte: Batista (2015).

Vieira (2013) apresenta a primeira calibração e validação, utilizando a base de dados do Projeto ONDISA (Trovati, 2001 e 2011), do modelo SWAN para o caso de Ilha Solteira, na versão 40.72 operada na plataforma SOPRO (Fortes *et al.*, 2006) desenvolvida e fornecida pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal). Este trabalho utilizou malhas três encaixadas (*nested grid*) de 1000 m (global), 500 m (região de aproximação da estação de monitoramento) e 250 m (entorno da estação de monitoramento).

O trabalho de Vieira (2013) apresenta boa concordância entre os resultados simulados e os medidos em campo (Projeto ONDISA), com tendência do modelo SWAN superestimar os resultados de altura significativa de onda (H_s). No trabalho tem-se que o índice de concordância foi de 70,2%, com índice de dispersão de 44% e de performance/desempenho de 56% considerando o período de outubro de 2010 a março de 2011, sendo que os índices foram calculados com base em nível de persistência de 97% de H_s , ou seja, as iterações são executadas até atingir esta porcentagem comparando o resultado H_s da iteração n com a $(n - 1)$.

Trabalhos que envolvem simulações numéricas contêm imprecisões devido às incertezas nas entradas (variáveis epistêmicas), bem como na calibração dos coeficientes do modelo devido à complexidade dos sistemas envolvidos e à limitação dos dados disponíveis. Pretende-se, assim, determinar a influência e predominância de determinado parâmetro físico quando comparado aos demais na modelagem.

Diversos pesquisadores discorrem sobre o tema por meio da calibração e validação dos modelos, contudo é escassa a discussão sobre a quantificação de incertezas (análise probabilística) e porcentagem de influência dos parâmetros/variáveis no modelo SWAN, por meio da métrica conhecida como índices de Sobol (Nikishova *et al.*, 2017). A fim de efetuar esse tipo de análise, Nikishova *et al.* (2017) utilizou o Método de Quase-Monte Carlo, uma abordagem não intrusiva que pode ser aplicada independentemente da complexidade ou não linearidade do modelo. Analisaram a sensibilidade global de nove parâmetros pelos índices de Sobol para o caso do Complexo de Instalações de Prevenção de Enchentes de São Petersburgo, Rússia.

Os autores verificaram, pela análise de sensibilidade global (índices de Sobol), que a direção do vento era o parâmetro mais importante. Além disso, a influência nas respostas do modelo também era dada pela incerteza na velocidade do vento, batimetria, nível d'água e índice de rebentação ($\gamma_b = Hs/d$). Desse modo, diminuir a incerteza da resposta é possível se os valores das entradas forem os mais precisos possíveis (Nikishova *et al.*, 2017).

No escopo desta Tese verifica-se o estudo no trecho da hidrovía Tietê-Paraná, no reservatório da hidrelétrica de Ilha Solteira/SP utilizando o modelo SWAN na versão 41.31. Esta localidade é explorada desde meados dos anos 90 no que tange estudos de hidrodinâmica, sendo empregados inicialmente modelos de segunda geração para simular alturas significativas de onda, com certo sucesso.

O grande diferencial do modelo de terceira geração (SWAN), neste caso específico, é a utilização da batimetria real e complexa do reservatório. Os artigos do grupo, que estão em parte no capítulo 2, relatam os avanços obtidos utilizando este modelo de terceira geração, mesmo que com dados escassos. Todavia ainda não se obteve a calibração e configuração adequada do modelo. Esta busca pela otimização é o cerne deste trabalho.

Os trabalhos anteriores do grupo de pesquisa ONDAFEIS, registrado no CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), apresentam dados

estatísticos promissores e com constante melhoria conforme se aprofunda o conhecimento no tema e área de estudo. Desse modo, este trabalho tem o grande objetivo de apresentar e comprovar a metodologia e modelagem mais acertada que resulte em estatísticas ainda melhores. Adianta-se que os resultados são animadores pois apresentam, em parte, as melhorias almejadas.

Assim exposto, dado o relevante papel da Hidrovia Tietê-Paraná na economia e sustentabilidade da região de estudo, esta tese visa simular, calibrar e validar o fenômeno de geração de ondas por ventos (em modo estacionário conforme recomendação do manual do modelo) e gerar banco de dados a partir do modelo numérico SWAN (modelo determinístico) em uma célula do reservatório da UHE Ilha Solteira (trecho da rota de navegação comercial), a fim quantificar as incertezas no modelo de acordo com as variáveis estudadas.

Tal contribuição é relevante, uma vez que há carência de estudos que considerem a batimetria complexa e a dinâmica do vento em reservatórios no Brasil; para o reservatório da UHE Ilha Solteira, por exemplo, não há aplicação de modelos numéricos com verificação mais apurada do índice de convergência do refinamento de malhas em toda a área de estudo, influência dos diversos parâmetros de entrada do SWAN nos resultados, e análise de sensibilidade dos parâmetros físicos na modelagem com abordagem probabilística, apesar de fazer parte de um relevante trecho de rota hidroviária comercial do Mercosul.

Cabe, por fim, ressaltar que a proposta numérica, traduz-se em elemento de supra importância na determinação da matriz de fragilidade do entorno do reservatório. O objetivo deste trabalho é, pois, explorar a hidrodinâmica das ondas geradas por vento no lago da barragem de Ilha Solteira, a partir de uma abordagem determinística com o código SWAN e probabilística para a quantificação de incertezas, incluindo a elaboração de metamodelo em *Polynomial Chaos Expansion* (PCE), via regressão (Marelli; Lüthen; Sudret, 2022). Dessa forma, busca-se determinar a sensibilidade e quantificar as incertezas dos parâmetros físicos intervenientes na geração e propagação de ondas, de forma ainda inexplorada, contribuindo para projetos multidisciplinares e estudos que visem melhorar as condições sociais, econômicas e de segurança principalmente voltadas à navegação e preservação ambiental.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. Geral

O principal objetivo deste doutoramento é analisar a hidrodinâmica, com apoio de quantificação de incertezas na vertente probabilística, para determinar a sensibilidade dos parâmetros físicos na propagação de ondas no reservatório da barragem de Ilha Solteira.

1.1.2 Específicos

- 1) Analisar a influência do refinamento de malhas (250 m, 150 m e 100 m), pelo método GCI (*Grid Convergence Index*), nos resultados de altura significativa de onda comparados com os dados de campo e o custo computacional;
- 2) Verificar a sensibilidade local e global dos parâmetros de entrada do modelo SWAN e sua influência nas simulações na região com maiores alturas significativas de onda;
- 3) Calibrar e validar o modelo SWAN na versão 41.31, de plataforma aberta, para o caso do trecho da hidrovia Tietê-Paraná no reservatório de Ilha Solteira/SP considerando os dados de campo (velocidade e direção de ventos e altura significativa de ondas) de janeiro de 2011 do Projeto ONDISA tratados e transformados em médias horárias;
- 4) Determinar o tamanho amostral das variáveis por meio de análise convergência do modelo referente à altura significativa de onda utilizando cinco variáveis aleatórias (velocidade e direção do vento, coeficiente de atrito de fundo e de *whitecapping* de JONSWAP e índice de quebra induzida de onda ($\gamma_b = Hs/d$)) geradas aplicando o método de Quase-Monte Carlo;
- 5) Criar metamodelo em Expansão em Polinômio Caos (PCE) e validar com técnicas probabilísticas: *leave-one-out*, 80/20 e *bootstrap*;
- 6) Quantificar as incertezas, a partir de método probabilístico, do modelo numérico substitutivo (PCE), utilizando, cinco variáveis aleatórias por meio da obtenção dos índices de Sobol.

1.2 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho se diferencia de trabalhos anteriores do Grupo de pesquisa, principalmente pela adoção da versão 41.31 do modelo SWAN em plataforma aberta, onde as simulações são executadas com base em nível de persistência de 99,5% de H_s , com utilização de malhas mais refinadas (garantindo convergência de malhas); análises físicas sobre os principais parâmetros envolvidos na propagação de ondas e adoção de médias horárias para os dados de vento (velocidade e direção).

Faz-se uma abordagem pioneira para a zona de estudo referente à metamodelagem (modelo simplificado ou abstrato que descreve o comportamento das ondas geradas por ventos, utilizando parâmetros e relações extraídos de modelos mais complexos ou de dados empíricos) e quantificação de incertezas do fenômeno de ondas geradas por ventos no reservatório de Ilha Solteira, que é complementar aos estudos determinísticos de calibração e validação do modelo SWAN.

Em um 1º momento, a pesquisa revisita o SWAN em versão mais atualizada (versão 41.31), em relação a trabalhos anteriores, e conduz cenários de simulação em célula de estudo (segmento da hidrovia comercial Tietê-Paraná), no reservatório da Hidrelétrica de Ilha Solteira. O grande diferencial do modelo de terceira geração (SWAN), neste caso específico da Tese, é a utilização da batimetria real e complexa do reservatório com diferentes resoluções de malhas e dados de ventos (velocidade e direção) em médias horárias. Em um 2º momento executa-se os estudos referentes a quantificação de incertezas associada a modelagem a partir da utilização de metamodelagem e obtenção de índices de Sobol.

Adicionalmente, são conduzidas análises físicas aprofundadas sobre os principais parâmetros que influenciam a propagação de ondas. Destaca-se também a utilização de médias horárias para os dados de vento (velocidade e direção), em contraste com a abordagem de Vieira (2013), que empregou dados de minuto a minuto. Uma das contribuições pioneiras é a introdução de técnicas de metamodelagem e quantificação de incertezas específicas para a zona de estudo.

O escopo desta pesquisa concentra-se na análise de um tema relevante e subexplorado: a hidrodinâmica em ambientes fechados, adotando tanto uma abordagem determinística quanto probabilística. Por meio de modelagem numérica e quantificação de incertezas, com uma ênfase inovadora no reservatório de Ilha Solteira, almeja-se desenvolver ferramentas que permitam uma análise mais precisa

dos fenômenos de ondas geradas por ventos para subsidiar anteprojetos mais assertivos no tocante à segurança, à navegação em hidrovias, proteção e preservação ambiental do entorno do reservatório. Essa precisão é particularmente crucial no que diz respeito à segurança, à navegação em hidrovias, à proteção e preservação ambiental nas proximidades do reservatório.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

Capítulo 1: Introdução

Apresentação de contextualização sobre a importância da hidrodinâmica em reservatórios de barragem, com ênfase na segurança da navegação e no planejamento de projetos em reservatórios de barragem no contexto brasileiro. São discutidos os desafios enfrentados na modelagem numérica de reservatórios, a relevância do modelo SWAN e a escassez de estudos específicos para esses ambientes no Brasil. O capítulo também estabelece os objetivos da pesquisa e sua contribuição para o conhecimento científico na área.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

Revisitação aos principais estudos e avanços no campo da hidrodinâmica em zonas costeiras e reservatórios de barragem, com foco em ondas geradas por ventos. São discutidos os modelos numéricos utilizados, como o SWAN, e as técnicas de análise de sensibilidade e quantificação de incertezas. A revisão bibliográfica busca embasar teoricamente a abordagem metodológica adotada na pesquisa.

Capítulo 3: Materiais e Métodos

Detalhamento da zona de estudo e são apresentadas informações sobre a topografia, o clima e as características físicas do reservatório, destacando sua importância na hidrovia Tietê-Paraná e na rota do Mercosul.

Especificação da metodologia utilizada na pesquisa, incluindo a análise de malhas, a automação do processo, a seleção de parâmetros do modelo SWAN e a análise probabilística. São discutidas as etapas seguidas para a realização das simulações numéricas e a obtenção dos resultados.

Capítulo 4: Resultados e Discussões

Os resultados obtidos a partir das simulações numéricas das vertentes determinísticas e probabilísticas são apresentados e discutidos neste capítulo. São analisadas as influências dos parâmetros do modelo nas simulações e comparados com dados de campo, visando validar as modelagens realizadas. São também discutidas as principais conclusões e contribuições do estudo para o conhecimento na área.

Capítulo 7: Considerações Finais

Apresentação das conclusões finais da pesquisa, destacando suas contribuições, limitações e sugestões para pesquisas futuras. São reafirmados os objetivos alcançados e discutida a relevância dos resultados obtidos para a compreensão da hidrodinâmica em reservatórios de barragem.

Publicações

Trabalhos desenvolvidos e publicados durante a elaboração da tese.

Referências

São listadas todas as referências bibliográficas utilizadas ao longo da tese, seguindo as normas de citação e referência adotadas.

Apêndices

Neste último segmento são apresentados os conteúdos complementares citados no texto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise abrangente dos parâmetros envolvidos na dissipação de energia pelas ondas revelou contribuições valiosas para compreender o comportamento das ondas em diferentes condições. Em baixas velocidades do vento, a variação do coeficiente de atrito de fundo não apresentou relevância, mas a desativação do *whitecapping* resultou em um aumento significativo da altura significativa das ondas. Com velocidades mais altas, o coeficiente de atrito se tornou mais relevante, especialmente próximo à margem.

Observou-se um padrão consistente de redução da H_s com a aproximação da margem. Em situações extremas de tempestades, os resultados mantiveram o padrão esperado, com pequenas diferenças absolutas na H_s . A desativação do parâmetro de quebra de ondas induzida pela profundidade resultou em uma drástica redução na dissipação de energia, levando a maiores valores de H_s próximo à margem. Nos pontos mais distantes da margem, a desativação dos parâmetros de quebra de ondas e difração teve um efeito relevante, mesmo em uma batimetria suave (análise mais detalhada faz-se necessária).

Na vertente determinística, a formulação de Janssen para a geração de ondas e o *whitecapping* demonstraram desempenho superior no caso de Ilha Solteira. A análise estatística revelou resultados aprimorados, marcando um avanço para a zona de estudo, previamente inexplorada. Embora a calibração ideal, com um índice de determinação (R^2) superior a 95%, não tenha sido totalmente alcançada, os progressos significativos obtidos neste estudo são cruciais para o aprimoramento contínuo dessa linha de pesquisa. O parâmetro chave, o *whitecapping*, mencionado por Zhang *et al.* (2023) como crucial, embora explorado, não foi exaustivamente analisado, sugerindo uma direção a ser seguida nas investigações futuras, p.e. avaliar uma gama maior de coeficientes.

Trabalhos recentes, como os de Zhang *et al.* (2023) e Sapiega, Zalewska, Struzik (2023), destacam a importância de determinar a configuração ideal do modelo SWAN para casos específicos. No primeiro, a calibração dos parâmetros físicos (p. e. coeficientes na equação) de geração e dissipação de energia no modelo não apresentou melhorias significativas. Entretanto, os autores exploraram diferentes formulações de geração e dissipação (como Komen e Janssen) para encontrar a

melhor configuração na baía de Bengala, a maior baía do mundo, localizada no nordeste do oceano Índico.

Esses autores propuseram um coeficiente de dissipação por *whitecapping* na equação de Komen, no modelo validado, de $3,25 \times 10^{-5}$, um valor substancialmente diferente do preconizado no manual, $2,36 \times 10^{-5}$. Isso destaca a influência significativa desse coeficiente na calibração em cada zona de estudo.

Já em Sapiega, Zalewska, Struzik (2023), os resultados foram distintos, observando que a formulação física de geração de onda “GEN3 ST6” teve melhor desempenho do que outras formulações para a região sul do mar Báltico, evidenciando a necessidade de avaliação de diferentes modelagens físicas para obtenção de calibração mais fidedigna aos dados de campo.

Ambos os estudos convergem na importância crucial do campo de ventos como principal fator na geração de ondas, ressaltando a necessidade de verificar diversas modelagens físicas, como o parâmetro *whitecapping*, para atingir uma calibração e replicação mais precisa dos dados de campo. Este cenário destaca a complexidade intrínseca do fenômeno, enfatizando a contínua necessidade de pesquisa e aprimoramento nos estudos de ondas geradas por ventos.

O *whitecapping* foi identificado como o principal mecanismo de dissipação de energia em maiores profundidades. Esses resultados enfatizam a necessidade crucial de considerar esses fatores em modelos e estudos de hidrodinâmica em recintos fechados, impulsionando avanços significativos nessa área de pesquisa.

Nos estudos de caso, os resultados das simulações numéricas para malha de 1000 m com modelagem padrão apresentaram um índice de concordância de 82% e um índice de desempenho de 67% em comparação com os dados de campo. Isto se traduz em melhorias na modelagem em relação a trabalhos anteriores na zona de estudo, como Mattosinho *et al.* (2022).

Tais resultados corroboram a potencialidade do modelo SWAN na previsão de ondas de vento em recintos fechados, preenchendo uma lacuna em relação à aplicabilidade e calibração do modelo SWAN na previsão de ondas de vento em reservatórios de barragens, considerando a dinâmica do vento e a batimetria complexa de águas profundas/intermediárias em zonas de transição.

O modelo numérico, em relação aos dados do Projeto ONDISA, apresentou a concordância esperada entre o período médio e a altura significativa das ondas,

mesmo usando um conjunto de dados escasso, provando-se uma ferramenta útil na previsão de riscos para o tráfego de embarcações (zonas críticas) em reservatórios.

Além disso, a metodologia aplicada neste trabalho pode ser utilizada para anteprojetos, estudos sobre proteção das margens, possíveis locais para implantação de sistemas de tanques-rede (piscicultura), para auxiliar na navegação segura através da hidrovía Tietê-Paraná e prever o impacto das ondas ao longo das margens, contribuindo para determinar o índice de vulnerabilidade do reservatório.

Na vertente probabilística, confirmamos as afirmações empíricas da literatura sobre a importância dos dados de vento e do parâmetro *whitecapping* na modelagem e calibração. Embora a escassez de dados de campo tenha limitado a análise de outros parâmetros, ressaltamos a necessidade de novas campanhas com metodologias refinadas para obter dados mais precisos, incluindo o período de onda.

Apesar da limitação de dados, gerou-se mapas de contorno para altura significativa e período de onda, alinhados com a física do problema. Esses mapas têm aplicações práticas em anteprojetos na zona de estudo, como em piscicultura e proteção ambiental.

O estudo de Majidi *et al.* (2023) destaca a importância da precisão na estimativa das condições da superfície livre, especialmente altura e períodos de ondas, para a produção de energia elétrica por conversores de energia das ondas. Utilizando o modelo SWAN, investigaram a incerteza na geração de energia por ondas, propondo melhorias através do ajuste dos parâmetros físicos.

Os resultados revelam que a modelagem dos parâmetros físicos do modelo SWAN impactam significativamente na incerteza da estimativa de produção de energia. O estudo aprofundou análises com diferentes modelagens para a costa atlântica da Península Ibérica.

Embora os autores tenham investigado a incerteza na modelagem com o SWAN, a quantificação de incertezas e a análise dos índices de Sobol não foram abordadas e são escassas na literatura de ondas geradas por ventos, evidenciando uma contribuição pioneira da Tese para o tema aplicado ao reservatório de Ilha Solteira e possivelmente a primeira abordagem nesse sentido no Brasil.

A disponibilidade de dados é um fator comum em trabalhos de alto impacto, especialmente em áreas costeiras marinhas de relevância econômica e social. A presença de diversas estações de aquisição de dados facilita a modelagem e calibração do SWAN para a área em questão.

Os resultados da análise estatística do metamodelo obtidos e a elaboração da equação adimensional oferecem informações relevantes para a compreensão da dinâmica das ondas em nosso caso de estudo. Inicialmente, destaca-se a considerável variabilidade observada nos dados, onde a altura significativa das ondas emerge como a variável mais dispersa, ao passo que o período médio das ondas apresenta uma menor variabilidade, indicando uma concentração mais próxima da média.

A análise de correlação de Spearman revelou associações estatisticamente significativas entre a velocidade do vento, a altura significativa das ondas e o período médio das ondas. É particularmente notável a alta correlação entre a velocidade do vento e a altura significativa das ondas, sugerindo que variações na velocidade do vento impactam diretamente na altura das ondas. Estes resultados corroboram a literatura existente e reforçam a relação intrínseca entre os parâmetros meteorológicos e as características das ondas.

Adicionalmente, a análise de regressão multivariada proporcionou um modelo para prever a altura significativa das ondas com base na velocidade do vento e no período médio das ondas. Com um coeficiente de determinação elevado ($R^2 = 0,973$) e baixo erro médio quadrático, este modelo pode ser eficaz na representação das relações complexas entre as variáveis estudadas.

Não obstante, destacamos a necessidade de obter uma batimetria refinada e atualizada do reservatório, especialmente em regiões próximas às margens. A fase exploratória evidenciou a significativa influência da interpolação dos dados batimétricos na criação de malhas, afetando diretamente os resultados.

Avanços para este trabalho incluem a investigação da influência de outros parâmetros relevantes na dissipação de energia das ondas, como a rugosidade do fundo e a presença de estruturas nas margens, e, forte provavelmente, a execução da vertente probabilística sugerida para determinação dos parâmetros mais significativos na geração de ondas por ventos em reservatórios de barragem.

Além disso, estudos adicionais podem explorar a interação entre as ondas e processos costeiros, como a erosão e sedimentação. A utilização de técnicas avançadas de modelagem e coleta de dados, como sensores remotos e simulações numéricas de alta resolução, também pode aprimorar a compreensão desses fenômenos.

Essas investigações podem fornecer conclusões valiosas para o desenvolvimento de modelagem mais precisas e aprimoradas para a dinâmica local, com aplicações importantes para a gestão e a previsão de eventos extremos

Diante do exposto, estudos e medições contínuas são necessários para reavaliar (explorar) o modelo numérico. Campanhas adicionais devem utilizar novas tecnologias para realizar medições adicionais de batimetria, implementar novos métodos para medição de ondas, além de realizar georreferenciamento e análise simultânea de *vento × ondas* (amplitudes, intensidades, duração, direção e períodos).

No entanto, uma avaliação detalhada da influência de cada processo físico no reservatório de Ilha Solteira deve ser realizada usando pelo menos 12 meses de dados e, na medida do possível, em pontos opostos em cada margem, ao longo do corpo d'água e especialmente no eixo de navegação. Tais ações constituiriam, num primeiro momento, condições para projetar e implementar um sistema de alerta a serviço dos usuários da hidrovía nos trechos de navegação dentro dos reservatórios de barragens.

O trabalho apresenta avanços no Estado da Arte e resultados são promissores, porém há limitações embutidas. A análise de sensibilidade pelos índices de Sobol depende da escolha dos parâmetros de entrada e pode não capturar completamente todas as fontes de incerteza. O metamodelo (PCE) a ser desenvolvido neste estudo é específico para a avaliação das ondas geradas por ventos em reservatórios de barragem e pode não ser aplicável a outras situações.

Outra limitação deste trabalho será a falta de ampla validação experimental dos resultados obtidos. Embora os resultados tenham sido validados utilizando técnicas estatísticas, ainda é necessário realizar experimentos para confirmar a precisão do modelo e sua aplicabilidade prática.

REFERÊNCIAS

ADAMS, B. M. *et al.* **Dakota, a multilevel parallel object-oriented framework for design optimization, parameter estimation, uncertainty quantification, and sensitivity analysis**: version 6.15 user's manual. California: Sandia National Laboratories, 2021. 356p.

ALVES, J. H. *et al.* Noaa's great lakes wave prediction system: a successful framework for accelerating the transition of innovations to operations. **American meteorological society (BAMS)**, n. 104, p. e837-e850, 2022.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – ASME. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, p. 1-4, 2008.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – ASME. **Verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer – ASME**. [S. l.]: ANSI, 2009, 101p. Disponível em: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/v-v-20-standard-verification-validation-computational-fluid-dynamics-heat-transfer>. Acesso em: 21, fev. 2023.

BATISTA, R. A. Sobrevoos à bacia do Rio Grande. 2015. 1 fot., color., JPG, 3,53 MB, 72 dpi, 5760x3840. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/65531. Acesso em: 8, jun. 2023.

BEJI, S.; BATTJES, J. A. Numerical simulation of nonlinear wave propagation over a bar. **Coastal Engineering**, v. 23, n. 1-2, p. 1-16, 1 maio 1994.

BOOIJ, N.; HOLTHUIJSEN, L. H.; RIS, R. C. The “Swan” wave model for shallow water. **Coastal Engineering**, v. 1, n. 25, p. 668-676, 29 jan. 1996.

BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C4, p. 7649–7666, 15 abr. 1999.

CAVALERI, L. *et al.* Wave modelling in coastal and inner seas. **Progress in Oceanography**, v. 167, p. 164–233, 1 out. 2018.

CAVALERI, L. *et al.* Ocean wave Physics and modeling: the message from the 2019 WISE meeting. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 100, n. 12, p. ES297-ES300, 1 dez. 2019.

COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER – CERC. Shore Protection manual volume 1, Tufelft. Washington, DC: **US Army Corps of Engineers**, 1984. Disponível em: <https://repository.tufelft.nl/islandora/object/uuid%3A98791127-e7ae-40a1-b850-67d575fa1289>. Acesso em: 21, fev. 2023.

COLLINS, J. I. Prediction of shallow-water spectra. **Journal of Geophysical Research**, v. 77, n. 15, p. 2693-2707, 20 maio 1972.

CRESTAUX, T.; MAITRE, O. L.; MARTINEZ, J. M. Polynomial chaos expansion for sensitivity analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 94, n. 7, p. 1161-1172, 1 jul. 2009.

CUNHA JR, A. Modeling and Quantification of Physical Systems Uncertainties in a Probabilistic Framework. **Probabilistic Prognostics and Health Management of Energy Systems**, p. 127–156, 1 jan. 2017.

CUNHA JR., A. **MaxEnt - Maximum Entropy Code**. Disponível em: <https://github.com/mericocunhajr/MaxEnt>. Acesso em: 28 fev. 2023.

DALBEY, K. R. *et al.* **Dakota, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Theory Manual (V.6.15)**. Livermore, California, EUA: Sandia National Laboratories, 9 nov. 2021.

DANTAS, E.; TOSIN, M.; CUNHA JR, A. Calibration of a SEIR–SEI epidemic model to describe the Zika virus outbreak in Brazil. **Applied Mathematics and Computation**, v. 338, p. 249–259, dez. 2018.

DIEBOLD, M.; HELLER, P. Scaling wind fields to estimate extreme wave heights in mountainous lakes. **Journal of Applied Water Engineering and Research**, v. 7, n. 1, p. 1–9, 23 abr. 2017.

DYACHENKO, S. A.; NEWELL, A. C. Whitecapping. **Studies in Applied Mathematics**, v. 137, n. 2, p. 199–213, 18 abr. 2016.

FISHMAN, G. S. **Monte Carlo, Concepts, Algorithms, and Applications**. 1. ed. [s.l.] Springer New York, NY, 1996. p. 1–698

FORTES, C. J. *et al.* SOPRO – Pacote integrado de modelos de avaliação dos efeitos das ondas em portos. **Tecnologias da Água**, v. 1, p. 51–61, 2006.

GAN, Y. *et al.* A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods: A case study with a hydrological model. **Environmental Modelling & Software**, v. 51, p. 269–285, jan. 2014.

GELCI, R.; CAZALE, H.; VASSAL, J. Prevision de la houle. La methode des densites spectro angulaires. **Bull. Inform. Comite Central Oceanogr. d'Etude Cotes**, v. 9, p. 416–435, 1957.

GONÇALVES, M.; MARTINHO, P.; GUEDES SOARES, C. Assessment of wave energy in the Canary Islands. **Renewable Energy**, v. 68, p. 774–784, ago. 2014.

GRUIJTHUIJSEN, M. F. J. **Validation of the wave prediction model SWAN using field data from Lake George, Australia**. Thesis—Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, The Netherlands, 1996.

GUILLOU, N. Wave-energy dissipation by bottom friction in the English Channel. **Ocean Engineering**, v. 82, p. 42–51, maio 2014.

HASSELMANN, K. *et al.* Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). **Deutschen Hydrographischen Zeitschrift**, v. 12, n. A8, p. 93, 1973.

HELTON, J. C. *et al.* Survey of sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 91, n. 10-11, p. 1175–1209, out. 2006.

HERNANDEZ, F. B. T. **Torres de transmissão de energia caem em Ilha Solteira - vento forte causou a queda**. 2010a. 1 vídeo (2:16 min). Publicado pelo canal AHI UNESP. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=-7aUYZA0XpQ>. Acesso em: 31 jul. 2022.

HERNANDEZ, F. B. T. Temporal prejudica geração de energia elétrica em Ilha Solteira. **UNESP - Hidráulica e Irrigação**, Ilha Solteira, 19 out. 2010b. Disponível em: https://www2.feis.unesp.br/irrigacao/temmais_com_19out10.php. Acesso em: 31 jul. 2022.

HOLANDA, F. S. *et al.* Formação de ondas e os processos erosivos nas margens do lago da UHE Xingó. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 887–887, 20 abr. 2020.

HOQUE, MD. A.; PERRIE, W.; SOLOMON, S. M. Application of SWAN model for storm generated wave simulation in the Canadian Beaufort Sea. **Journal of Ocean Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 19–34, mar. 2020.

JALIL, A. *et al.* Wind-induced hydrodynamic changes impact on sediment resuspension for large, shallow Lake Taihu, China. **International Journal of Sediment Research**, v. 34, n. 3, p. 205–215, 1 jun. 2019.

JIN, K.-R.; JI, Z.-G. Calibration and verification of a spectral wind-wave model for Lake Okeechobee. **Ocean Engineering**, v. 28, n. 5, p. 571–584, 1 maio 2001.

KIUREGHIAN, A. D.; DITLEVSEN, O. Aleatory or epistemic? Does it matter? **Structural Safety**, v. 31, n. 2, p. 105–112, mar. 2009.

KOMEN, G. J.; HASSELMANN, S.; HASSELMANN, K. On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum. **Journal of Physical Oceanography**, v. 14, n. 8, p. 1271–1285, 1 ago. 1984.

LEMKE, N. *et al.* Wave directional measurement in Patos Lagoon, RS, Brazil. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 22, n. 0, 1 jan. 2017.

LEMKE, N. *et al.* Estimativa de cenários característicos de ondas na enseada de São Lourenço do Sul, Lagoa dos Patos. **Exatas & Engenharia**, v. 8, n. 20, 22 fev. 2018.

LEMKE, N. *et al.* Morfodinâmica da foz do Arroio Carahá em laguna costeira micromaré (Lagoa dos Patos, sul do Brasil). **Pesquisas em Geociências**, v. 48, n. 3, 30 set. 2021.

LEMKE, N. *et al.* Estudo comparativo entre modelagem e medições de ondas na Lagoa dos Patos - RS, Brasil. *In*: SIMPÓSIO SOBRE ONDAS, MARÉS, ENGENHARIA OCEÂNICA E OCEANOGRAFIA POR SATÉLITE (XI OMARSAT), 11., Arraial do Cabo, 2015. **Anais [...]**. Arraial do Cabo: Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira., 2015.

LI, J. *et al.* Numerical investigation of wave propagation and transformation over a submerged reef. **Coastal Engineering Journal**, v. 61, n. 3, p. 363–379, 2 maio 2019.

LIMA, G. M. V. *et al.* Estimativa do Transporte Sedimentar Induzido por Ondas de Norte na Porção Sul da Margem Oeste do Canal do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande (4ª Secção da Barra do Rio Grande, RS). **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, v. 5, n. 1, p. 177–185, 12 fev. 2019.

MACIEL, G. DE F. *et al.* Aplicação do Modelo Numérico SWAN à Geração e Propagação de Ondas Geradas por Vento em Recintos Fechados. *In*: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 25., San José, 2012. **Anais [...]** San José, Costa Rica.: IAHR, 2012.

MADSEN, O.; POON, Y.-K.; GRABER, H. C. Spectral wave attenuation by bottom friction: theory. **Coastal Engineering Proceedings**, v. 1, n. 21, p. 34–34, 29 jan. 1988.

MAÎTRE, O. P.; KNIO, O. M. **Spectral Methods for Uncertainty Quantification**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010.

MAJIDI, A. G. *et al.* Assessing the impact of wave model calibration in the uncertainty of wave energy estimation. **Renewable Energy**, v. 212, p. 415–429, 1 ago. 2023.

MAO, M. *et al.* Modeling wind waves from deep to shallow waters in Lake Michigan using unstructured SWAN. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 121, n. 6, p. 3836–3865, 1 jun. 2016.

MARELLI, S. *et al.* **UQLab User Manual Sensitivity Analysis UQLab**. Zurich, Switzerland: Chair of Risk, Safety and Uncertainty Quantification, ETH Zurich, 2022. Disponível em: <https://www.uqlab.com/sensitivity-user-manual>. Acesso em: 21, fev. 2023.

MARELLI, S.; LÜTHEN, N.; SUDRET, B. **UQLAB user manual polynomial chaos expansions**. Zurich, Switzerland: Chair of Risk, Safety and Uncertainty Quantification, ETH Zurich, 2022. Disponível em: <https://www.uqlab.com/pce-user-manual>. Acesso em: 21, fev. 2023.

MARELLI, S.; SUDRET, B. UQLab: A Framework for Uncertainty Quantification in

Matlab. Second International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management (ICVRAM) and the Sixth International Symposium on Uncertainty, Modeling, and Analysis (ISUMA), p. 2554–2563, 7 jul. 2014.

MARINHO, C. *et al.* Wave regime characterization in the northern sector of Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. **Ocean and Coastal Research**, v. 68, 1 jan. 2020.

MARQUES, M.; ANDRADE, F. O. Automated computation of two-dimensional fetch fields: case study of the Salto Caxias reservoir in southern Brazil. **Lake and Reservoir Management**, v. 33, n. 1, p. 62–73, 2 jan. 2017.

MATTOSINHO, G. DE O. **Comparação entre os softwares ONDISACAD e SWAN na estimativa de altura significativa de ondas geradas por vento no reservatório da barragem de Ilha Solteira - SP**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em Engenharia Civil) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2015.

MATTOSINHO, G. DE O. **Dissipação de Energia de Ondas Geradas por Ventos em Reservatórios de Barragens, devido à presença de Vegetação**. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2016.

MATTOSINHO, G. DE O. *et al.* Dissipação de energia de ondas pela vegetação em recintos fechados. *In*: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA (IAHR), 28., Buenos Aires, 2018. **Proceedings** [...]. Buenos Aires, Argentina: 2018.

MATTOSINHO, G. DE O. *et al.* Estimativa de altura de ondas geradas por ventos no reservatório de Belo Monte – PA / Predicting wind waves's height in Belo Monte Reservoir – PA. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 8, p. 80255–80271, 12 ago. 2021a.

MATTOSINHO, G. DE O. *et al.* Meteorological-hydrodynamic model coupling for safe inland navigation of waterway stretches in dam reservoirs, using a scarce database. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 27, n. e1, 2022.

MATTOSINHO, G. DE O. *et al.* Modelagem de ondas em reservatórios: inovações para otimização dos usos múltiplos do reservatório de ilha solteira. **Peer Review**, v. 5, n. 13, p. 271–290, 2023.

MATTOSINHO, G. DE O.; FERREIRA, F. DE O.; MACIEL, G. DE F. Simulações numéricas da propagação de onda em lago de reservatório de barragem com fundo vegetado. **Delos: desarrollo local sostenible**, v. 16, n. 42, p. 172–185, 2023.

MATTOSINHO, G. DE O.; MACIEL, G. DE F.; VIEIRA, A. S. O modelo Swan-Veg como ferramenta útil na previsão de ondas em reservatórios de barragens. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8618–8628, 2019.

MATTOSINHO, G. DE O.; VIEIRA, A. S. **Influência da Vegetação na Atenuação de Energia de Ondas**. Editora Appris Ltda, 2020.

MATTOSINHO, G. O. *et al.* **Modelos de previsão de alturas de ondas: estudo de caso com modelos de segunda e terceira geração.** *In:* CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA; IAHR LAD CONGRESS, 29., Cidade do México, 2021. **Proceedings** [...]. Cidade do México: IAHR, 2021b.

MATTOSINHO, G. O. *et al.* A review of FUNWAVE model applications in the propagation of waves generated by vessels. Developments in Maritime Technology and Engineering. *In:* INTERNATIONAL CONFERENCE ON MARITIME TECHNOLOGY AND ENGINEERING (MARTECH), 5., Lisboa, 2021. **Anais** [...]. Londres: CRC Press, Taylor & Francis Group, 8 jul. 2021c.

MILES, J. W. On the generation of surface waves by shear flows. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 3, n. 02, p. 185–204, nov. 1957.

MOEINI, M. H.; ETEMAD-SHAHIDI, A. WAVE PARAMETER HINDCASTING IN A LAKE USING THE SWAN MODEL. **Scientia Iranica**, v. 16, n. 2, p. 156–164, 1 abr. 2009.

MOROKOFF, W. J.; CAFLISCH, R. E. Quasi-Monte Carlo Integration. **Journal of Computational Physics**, v. 122, n. 2, p. 218–230, dez. 1995.

NAGEL, J. B.; RIECKERMANN, J.; SUDRET, B. Principal component analysis and sparse polynomial chaos expansions for global sensitivity analysis and model calibration: Application to urban drainage simulation. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 195, p. 106737, mar. 2020.

NIKISHOVA, A. *et al.* Uncertainty quantification and sensitivity analysis applied to the wind wave model SWAN. **Environmental Modelling & Software**, v. 95, p. 344–357, set. 2017.

NISPEL, A. *et al.* Uncertainty Quantification for Fatigue Life of Offshore Wind Turbine Structure. **ASCE-ASME J Risk and Uncert in Engrg Sys Part B Mech Engrg**, v. 7, n. 4, 12 jul. 2021.

NORENBERG, J. P. *et al.* Global Sensitivity Analysis of (a)Symmetric Energy Harvesters. **Electrical Engineering and Systems Science: Systems and Control**, 9 ago. 2021.

NOSSENT, J.; ELSSEN, P.; BAUWENS, W. Sobol' sensitivity analysis of a complex environmental model. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 12, p. 1515–1525, 1 dez. 2011.

OU, S.-H. *et al.* Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan. **Ocean Engineering**, v. 29, n. 8, p. 947–971, jul. 2002.

PALAR, P. S. *et al.* Global sensitivity analysis via multi-fidelity polynomial chaos expansion. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 170, p. 175–190, 1 fev. 2018.

PANNELL, D. Sensitivity analysis of normative economic models: theoretical framework and practical strategies. **Agricultural Economics**, v. 16, n. 2, p. 139–152, maio 1997.

PARUOLO, P.; SAISANA, M.; SALTELLI, A. Ratings and rankings: voodoo or science? **Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)**, v. 176, n. 3, p. 609–634, 1 nov. 2012.

PERES, C. V. Z. *et al.* **ROLL WAVES EM ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE EM REGIME TURBULENTO: CANAL E VERTEDOIRO DE BARRAGEM.** In: XXIV SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Belo Horizonte, MG: 2021.

PHILLIPS, O. M. On the generation of waves by turbulent wind. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 2, n. 05, p. 417–445, jul. 1957.

ROGERS, W. E.; BABANIN, A. V.; WANG, D. W. Observation-Consistent Input and Whitecapping Dissipation in a Model for Wind-Generated Surface Waves: Description and Simple Calculations. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 29, n. 9, p. 1329–1346, 1 set. 2012.

RÓŻYŃSKI, G. Local Wave Energy Dissipation and Morphological Beach Characteristics along a Northernmost Segment of the Polish Coast. **Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics**, v. 65, n. 2, p. 91–108, 1 dez. 2018.

SALTELLI, A. *et al.* Global Sensitivity Analysis. The Primer. **John Wiley & Sons, Ltd**, 18 dez. 2007.

SALTELLI, A.; ANNONI, P. How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n. 12, p. 1508–1517, dez. 2010.

SÃO PAULO (ESTADO). PORTAL DO GOVERNO. **Hidrovia Tietê-Paraná bate recorde de movimentação de cargas em 2023.** Governo do Estado de São Paulo, 9 ago. 2023. Disponível em: <<https://www.saopaulo.sp.gov.br/ultimas-noticias/hidrovia-tiete-parana-bate-recorde-de-movimentacao-de-cargas-em-2023/>>. Acesso em: 29 ago. 2023

SAPIEGA, P.; ZALEWSKA, T.; STRUZIŁ, P. Application of SWAN model for wave forecasting in the southern Baltic Sea supplemented with measurement and satellite data. **Environmental Modelling & Software**, v. 163, p. 105624, jan. 2023.

SHU, Z. *et al.* Evaluation of the impact of multi-source uncertainties on meteorological and hydrological ensemble forecasting. **Engineering**, v. 24, jul. 2022.

SIMÃO, C. E. **Estudo do Padrão de Ondulações na Lagoa dos Patos utilizando o modelo SWAN (DELFT3D), RS, Brasil.** Dissertação — Universidade Federal do Rio Grande (FURG), 2016.

SIQUEIRA, A. G. *et al.* Wave Modeling and Coastal Erosion in Upstream Dams.

AEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018 - Volume 4. **Anais** [...]. Springer, Cham, 26 ago. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93133-3_2. Acesso em: 21 fev. 2023.

SOBOL, I. M. On quasi-Monte Carlo integrations. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 47, n. 2-5, p. 103–112, ago. 1998.

SOBOL, I. M.; SHUKMAN, B. V. Random and quasirandom sequences: Numerical estimates of uniformity of distribution. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 18, n. 8, p. 39–45, 1 out. 1993.

SOIZE, C. **Uncertainty Quantification: An Accelerated Course with Advanced Applications in Computational Engineering**. Softcover reprint of the original 1st ed. 2017 edition ed. [s.l.] Springer, 2018.

SONG, X. *et al.* Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 739–757, abr. 2015.

STOLYAROVA, E. *et al.* Modeling of the Extreme Wind Waves in the Gorky Reservoir. In: **Processes in GeoMedia—Volume II**. Moscow, Russia: Springer Geology, 2021. v. 2p. 399–405.

SUDRET, B. Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 93, n. 7, p. 964–979, jul. 2008.

SWATRIDGE, L. L. *et al.* Coupled modelling of storm surge, circulation and surface waves in a large stratified lake. **Journal of Great Lakes Research**, v. 48, n. 6, p. 1520–1535, 1 dez. 2022.

THE SWAN TEAM. **User manual SWAN Cycle III version 41.31**. Delft, The Netherlands: Environmental Fluid Mechanics Section, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 2020a.

THE SWAN TEAM. **SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION**. Delft, The Netherlands: Environmental Fluid Mechanics Section, Environmental Fluid Mechanics Section, Delft University of Technology, 2020b.

TOLDO JUNIOR, E. E. *et al.* Wave prediction along lagoa do patos coastline. **Southern Brazil**, v. 28, n. 2, p. 87–95, 2006.

TOSIN, M.; CORTÊS, A.; CUNHA, A. A Tutorial on Sobol' Global Sensitivity Analysis Applied to Biological Models. In: SANTOS, F. A. B.; CARELS, N.; TRINDADE DOS SANTOS, M. L. (Eds.). **Networks in Systems Biology, Computational Biology**, vol. 32. [s.l.] Springer, Cham, v. 32, 2020.

TROVATI, L. R. **Produção de ondas induzidas pelo vento no lago de Ilha Solteira**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista (UNESP) Faculdade de Engenharia, Laboratório de Hidrologia e Hidrometria, 2001. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/hidrologialh/rel_final_

ondisa1.pdf. Acesso em: 21 fev. 2023.

TROVATI, L. R. **Projeto ONDISA5: Hidrovia Tietê–Paraná: alerta de vento e ondas para segurança da navegação**: relatório final. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Laboratório de Hidrologia e Hidrometria, jun. 2011.

TROVATI, L. R. **Projeto ONDISA 8**: desenvolvimento de tecnologia para transposição de barragens e de instrumentação para segurança da navegação hidroviária. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Laboratório de Hidrologia e Hidrometria, 2015.

VIEIRA, A. S. **Análises, aplicações e validações**: numérico/experimentais do modelo SWAN em áreas restritas e ao largo. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2013.

VIEIRA, A. S. *et al.* Application of the numerical model SWAN in locations with vegetatio in the Tiete-Paraná waterway: lake of Ilha Solteira’s Dam – Brazil. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MARITIME TECHNOLOGY AND ENGINEERING, 2., 2014, Lisboa. **Anais...**Lisboa: [S. l.], 2014.

VIEIRA, A. S. *et al.* Aplicação do modelo numérico SWAN em locais com vegetação no lago da barragem de ilha solteira. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 7, n. 2, p. 156–167, 10 jul. 2015.

VIEIRA, A. S.; FORTES, J. C.; MACIEL, G. DE F. Comparative analysis of wind generated waves on the Ilha Solteira lake, by using numerical models OndisaCad and Swan. *In*: INTERNATIONAL SHORT CONFERENCE ON APPLIED COASTAL RESEARCH – SCACR, 5., 2011, Aachen. **Anais** [...]. Aachen: SCACR, 2011.

VIEIRA, A. S.; MATTOSINHO, G. O.; MACIEL, G. F. Simulação numérica do amortecimento de ondas em reservatório de barragens. *In*: SILVA, H. C. (ed.). **Gestão de Recursos Hídricos e Sustentabilidade**. Ponta Grossa: Editora Atena, 2019. v. 4. p. 31–39.

WANG, Y. *et al.* Numerical simulation of wave propagation through rigid vegetation and a predictive model of drag coefficient using an artificial neural network. **Ocean Engineering**, v. 281, p. 114792–114792, 1 ago. 2023.

WILLMOTT, C. J. *et al.* Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995, 1985.

WU, W. *et al.* A quantitative method to calibrate the SWAN wave model based on the whitecapping dissipation term. **Applied Ocean Research**, v. 114, p. 102785, set. 2021.

XU, Y. *et al.* Analysis of the spatial and temporal sensitivities of key parameters in the SWAN model: An example using Chan-hom typhoon waves. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 232, p. 106489, jan. 2020.

YOUNG, I. R.; VERHAGEN, L. A. The growth of fetch limited waves in water of finite depth. Part 1. Total energy and peak frequency. **Coastal Engineering**, v. 29, n. 1-2, p. 47–78, dez. 1996.

ZHANG, W. *et al.* Assessing the performance of SWAN model for wave simulations in the Bay of Bengal. **Ocean Engineering**, v. 285, p. 115295–115295, 1 out. 2023.

ZHANG, Y.; LYU, L.; LI, P. An optimized volume of fluid method for modelling three-dimensional debris flows. Implementation in OpenFOAM, validation, and application in the Aiwa Watershed, Beijing. **Computers and Geotechnics**, v. 144, p. 104651, abr. 2022.

PUBLICAÇÕES

MATTOSINHO, G. DE O.; MACIEL, G. DE F.; VIEIRA, A. S. O modelo Swan-Veg como ferramenta útil na previsão de ondas em reservatórios de barragens. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8618-8628, 2019.

MATTOSINHO, G. O. *et al.* Modelos de previsão de alturas de ondas: estudo de caso com modelos de segunda e terceira geração. *In*: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 29., 2021, Curitiba. **Anais [...]**. México: IAHR, 2021b.

MATTOSINHO, G. O. *et al.* A review of FUNWAVE model applications in the propagation of waves generated by vessels. **Developments in Maritime Technology and Engineering**, n. 16, p. 421-428, 2021c.

MATTOSINHO, G. DE O. *et al.* Meteorological-hydrodynamic model coupling for safe inland navigation of waterway stretches in dam reservoirs, using a scarce database. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 27, n. e1, 2022.

MATTOSINHO, G. DE O. *et al.* Modelagem de ondas em reservatórios: inovações para otimização dos usos múltiplos do reservatório de Ilha Solteira. **Peer Review**, v. 5, n. 13, p. 271-290, 16 jun. 2023.

MATTOSINHO, G. DE O.; FERREIRA, F. DE O.; MACIEL, G. DE F. Simulações numéricas da propagação de onda em lago de reservatório de barragem com fundo vegetado. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, v. 16, n. 42, p. 172-185, 2023.

MATTOSINHO, G. DE O.; FERREIRA, F. DE O.; MACIEL, G. DE F. Impactos dos parâmetros físicos na dissipação de energia das ondas geradas pelo vento em corpos d'água interiores. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 25., 2024, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: ABRHidro, 2024. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14985>. Acesso em: 11 fev. 2024.