

## Previsão da Altura Significativa de Ondas Usando Redes Neurais Artificiais Baseadas em Variáveis Físicas

Matheus B. Campos<sup>1</sup>, Eduarda N. Ebling<sup>2</sup>

Curso de Matemática - UFSM, Santa Maria, RS

Felipe C. Minuzzi<sup>3</sup>

UFSM, Santa Maria, RS

A previsão de ondas é de fundamental importância em muitos aspectos ligados às operações navais, atividades marítimas comerciais e proteção costeira [1]. Além disso, as previsões envolvendo ondas utilizam técnicas similares às utilizadas na previsão do clima atmosférico, e podem ser simuladas por modelos matemáticos, os quais envolvem uma grande quantidade de dados e podem ser simulados numericamente por modelos como o SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), o qual é um modelo de ondas de terceira geração, desenvolvido na Universidade de Tecnologia de Delft [2].

De acordo com [3], um modelo de ondas é um sistema composto pelas equações e relações matemáticas que culminam na equação do balanço. Nesse aspecto, essa equação é escrita em termos do espectro da frequência ( $f$ ) e da direção ( $\theta$ ), ou seja,  $F(f, \theta)$  e deve ser resolvida numericamente. Seja  $D$  a região marítima de interesse e  $I = [t_0, t_f]$  o intervalo de tempo, com  $t_f$  representando o prazo da previsão. O problema de previsão de ondas é dado pela equação

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{C}_g \cdot \Delta_{\mathbf{C}_g} F = S_{in}(\mathbf{u}, F, t) + S_{nl}(F, t) + S_{ds}(F, t) \quad (1)$$

em que os termos a direita da equação indicam os termos fontes de vento ( $S_{in}$ ), dissipação da energia ( $S_{ds}$ ) e interação não-linear de onda ( $S_{nl}$ ), já o termo  $\mathbf{C}_g$  indica a velocidade de propagação da onda. Além disso, para resolver este problema é preciso conhecer o espectro inicial em  $t_0$  e o campo de vento  $\mathbf{u}$  para todo  $t$  (tempo) em  $I$ .

A partir da equação dada em (1), podemos encontrar o espectro da onda e com isso determinar sua altura. Para isso, definimos a função densidade de probabilidade  $f$  para a altura de ondas indicando que a probabilidade de uma altura  $H$  entre  $H_1$  e  $H_2$  ocorrer é

$$Pr[H_1 \leq H \leq H_2] = \int_{H_1}^{H_2} f(s) ds \quad (2)$$

e, assumindo que a ocorrência da altura de ondas é um processo de banda estreita, temos que

$$f(s) = \frac{2s}{R} e^{-\frac{s^2}{R}}, \quad 0 \leq s < \infty \quad (3)$$

onde  $R$  é um parâmetro que pode ser relacionado com o espectro de ondas por  $R = 8m_0$ .

Porém, determinar a altura em todos os pontos na superfície de um oceano em cada instante de tempo ( $t$ ) não é uma tarefa fácil. Neste caso, pode-se utilizar a média das alturas das ondas para várias porções do oceano e a partir disso determinar a *altura significativa de ondas*  $H_s$ , o qual é

<sup>1</sup>matheusbrum36@gmail.com

<sup>2</sup>eduardanaysingerebling@gmail.com

<sup>3</sup>felipe.minuzzi@ufsm.br

um conceito utilizado em medições *in situ* e remotas e em modelagem matemática. Dividindo as alturas em três terços, as menores, intermediárias e as maiores, a altura significativa é a média do terço das alturas mais altas.

Entretanto, podemos desenvolver uma definição mais técnica para a  $H_s$ . Seja  $s_{\frac{1}{3}}$  o limite inferior do terço das alturas mais altas. Com isso, a probabilidade de uma altura  $H$  exceder  $s_{\frac{1}{3}}$  é  $\frac{1}{3}$ . Assim,

$$Pr \left[ H \geq s_{\frac{1}{3}} \right] = \int_{s_{\frac{1}{3}}}^{\infty} \frac{2s}{R} e^{-\frac{s^2}{R}} ds = \frac{1}{3}. \quad (4)$$

Resolvendo a integral e aproximando o valor numérico, obtemos que a altura significativa é determinada por meio probabilístico e é calculado pela seguinte equação:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (5)$$

em que o termo  $m_0$  está relacionado com o espectro da onda, o qual é obtido resolvendo a equação (1).

Deve-se pontuar que os valores da altura significativa calculados por meio desses modelos de previsão ou medido frequentemente estão de acordo com valores reais observados, e isto destaca a ideia de  $H_s$  ser uma média adequada. Entretanto, o custo computacional para simulações com modelos numéricos tradicionais possui um alto custo e, com a disponibilidade de grandes bases de dados históricos, podemos considerar a utilização de modelos de aprendizado de máquina para simular o problema e as redes neurais aparecem como uma ótima alternativa para isso.

Neste trabalho buscamos abordar a previsão de ondas usando redes neurais [4], por meio de variáveis físicas que melhor se associam com a altura. Nesse aspecto, no treinamento da rede neural serão utilizadas variáveis que possuem melhor relação física com  $H_s$ , como: período de onda, velocidade do vento horizontal e vertical, entre outras. Além disso, também iremos abordar que as variáveis físicas que melhor se relacionam com a altura de onda não são as com a melhor correlação estatística com  $H_s$ . Em seguida, iremos analisar a diferença entre resultados usando essas duas abordagens e buscar possíveis similaridades. A previsão que será realizada é referente a uma localização no oceano, na costa sul do Brasil.

## Agradecimentos

Agradecemos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) por tornar viável a elaboração deste trabalho, por meio do incentivo financeiro.

## Referências

- [1] E. S. C. Neto, V. Innocentini e R. P. Rocha. **Um sistema de previsão de tempo e de ondas oceânicas para o Atlântico Sul**. 44a. ed. São Paulo: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 1996, pp. 35–46.
- [2] N. Booij, L. H. Holthuijsen e R. C. Ris. “The SWAN wave model for shallow water”. Em: **Coastal Engineering Proceedings**. ASCE, 1997, pp. 668–676.
- [3] L. Farina. **Ondas Oceânicas de Superfície**. 2a. ed. São Carlos, SP: (Notas em Matemática), 2012.
- [4] F. C. Minuzzi e L. Farina. “A deep learning approach to predict significant wave height using long short-term memory”. Em: **Ocean Modelling** 181 (2023), p. 102151.