

## Modelagem de Ondas Oceânicas Utilizando *Ensemble* de Redes Neurais Artificiais

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

Curso de Matemática - UFSM, Santa Maria, RS

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

UFSM, Santa Maria, RS

Assim como é possível através de técnicas de simulação numéricas obter previsões do clima atmosférico, usando técnicas semelhantes pode-se obter previsões de ondas oceânicas. Os estudos relacionados à previsão da altura significativa de ondas são de extrema importância para a segurança da navegação, das operações portuárias, e das atividades realizadas nas plataformas *offshore* de exploração de óleo e gás, visto que os impactos gerados por eventos extremos podem ocasionar grandes prejuízos econômicos e sociais [2]. Desta forma, a previsão da altura significativa de ondas, bem como dos eventos extremos de onda, tornam-se fundamentais para a prevenção de acidentes e a manutenção de serviços vitais para a economia do país.

Um modelo de ondas é um sistema de equações e relações matemáticas que culminam na equação do balanço, a qual usualmente é escrita em termos do espectro da frequência-direção  $F(f, \theta)$ . Fisicamente, a previsão de ondas é realizada pelas equações diferenciais parciais deduzidas a partir das equações de Navier-Stokes [3]. Considerando  $D$  a região de interesse e  $I = [t_0, t_f]$  o intervalo de tempo, com  $t_f$  denotando o prazo de previsão, o problema de previsão de ondas é dado conforme Equação 1.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{C}_g \cdot \nabla_{\mathbf{C}_g} F &= S_{in}(\mathbf{u}, F, t) + S_{nl}(F, t) + S_{ds}(F, t) & f \in (0, \infty), \theta \in [0, 2\pi]; \\ F(f, \theta, x, t_0) &= F_0(f, \theta, x) & (x, t) \in D \times I; \\ F(f, \theta, x, t) &= 0 & x \in \partial D; \\ F(f, \theta, x, t) &= F(f_{h_f}(t), \theta, x, t) & f \in [f_{h_f}, \infty]. \end{aligned} \quad (1)$$

Os termos a direita da igualdade na primeira equação indicam os termos fontes de vento ( $S_{in}$ ), dissipação ( $S_{ds}$ ) e interação não-linear de onda ( $S_{nl}$ ). Além disso, podem ser considerados termos fontes que sejam relevantes. O termo  $\mathbf{C}_g$  indica a velocidade da onda,  $F_0$  o espectro inicial,  $f$  a frequência angular,  $f_{h_f}$  a frequência de corte usada para delimitar a parte de alta frequência do espectro com um parâmetro exponencial,  $\mathbf{u}$  o campo de vento,  $x$  a variável espacial e  $t$  o tempo.

Para determinar a altura de ondas para toda latitude/longitude na superfície do oceano, para cada instante de tempo  $t$ , pretende-se utilizar médias das alturas de ondas para várias porções do oceano. Assumindo um espectro de banda estreita, pode-se estimar as alturas de ondas através da função densidade de probabilidade conforme Equação 2.

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

<sup>1</sup>eduarda.naysingerebling@gmail.com

<sup>2</sup>matheusbrum36@gmail.com

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

onde  $R$  é um parâmetro que está relacionado com o espectro de ondas  $F$  e é dado pela Equação 3.

$$R = 8m_0. \quad (3)$$

Se  $s_{1/3}$  é o limite inferior do terço das alturas mais altas, a probabilidade de uma altura  $H$  exceder  $s_{1/3}$  é  $\frac{1}{3}$ , conforme Equação 4.

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

Integrando a equação acima e utilizando a relação dada em (3), obtêm-se a definição para altura significativa de ondas, dada pela Equação 5.

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

ou seja, a altura significativa de ondas é quatro vezes a raiz quadrada da integral do espectro de ondas com a hipótese de um espectro de banda estreita.

Diversos modelos numéricos são utilizados na previsão de ondas, tais como o SWAN e WAVEWATCH III, os quais geralmente envolvem uma grande quantidade de dados. Uma alternativa às estimativas determinísticas é obtida através de uma previsão *ensemble*, a qual, em meteorologia e ciências da natureza, significa que um conjunto de prognósticos são produzidos a partir de diferentes condições iniciais [1].

A grande quantidade de dados assimilados e os cálculos realizados pelos modelos numéricos tornam alto o custo computacional da simulação do modelo de ondas, quando comparado ao processamento necessário para a previsão utilizando redes neurais artificiais. Assim, neste trabalho, pretende-se desenvolver uma estratégia de treinamento de redes neurais para realizar a previsão da altura significativa de onda em uma localização no oceano na costa sul do Brasil. Mais especificamente, serão utilizadas diferentes arquiteturas de redes neurais para obter diferentes prognósticos e, com isso, o resultado final será obtido pela média aritmética das previsões de cada rede, formando assim um *ensemble* de redes neurais. Essa estratégia será utilizada pois, em geral, em modelagem de ondas e previsão atmosférica, a utilização de *ensemble* fornece a obtenção de melhores resultados [1].

No treinamento de cada arquitetura de rede neural, pretende-se utilizar a série histórica da altura significativa de onda, do período e da velocidade dos ventos. Nesse sentido, a altura é utilizada tanto como atributo no treinamento como *target* do modelo de rede neural.

## Agradecimentos

Agradecemos ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC - CNPq) por tornar viável a elaboração deste trabalho, por meio do incentivo financeiro.

## Referências

- [1] L. Farina. **Ondas Oceânicas de Superfície**. 2a. ed. São Carlos, SP:(Notas em Matemática Aplicada): SBMAC, 2012.
- [2] P. Marangoni. “Previsão de altura significativa de onda utilizando redes neurais artificiais”. Dissertação de mestrado. UFRJ, 2021.
- [3] 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.