

## POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS NA COSTA BRASILEIRA

Antonio Santos Sánchez  
Diego Arruda Rodrigues  
Ricardo de Araújo Kalid  
Ednildo Andrade Torres

*Universidade Federal da Bahia*

### RESUMO

Apresenta-se um modelo matemático em redes neurais para a avaliação do potencial de geração de energia elétrica mediante ondas. O objetivo é desenvolver um modelo confiável, capaz de avaliar de maneira precisa este recurso nos locais mais promissores da costa brasileira. Para validar o modelo, foi usada uma série de medições diretas, registradas durante 10 meses consecutivos por um perfilador acústico de ondas. O modelo conseguiu caracterizar o comportamento desta fonte renovável no local com um erro médio de 9,25%.

Palavras-chave: Potencial das ondas, Energia renovável, Energia ondomotriz, Modelagem matemática.

### ABSTRACT

It is presented a mathematical model using neural networks for the assessment of the wave energy potential. The objective is to assess accurately this resource in the most promising sites of the Brazilian coast. To validate the model, it was used a data series registered during 10 consecutive months by an acoustic wave profiler. The model was able to characterize the behavior of this renewable source in the site with an average error of 9.25%.

Keywords: Wave potential, Renewable energy, Wave energy, Mathematical modelling.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Estado da Técnica

Existem iniciativas no mundo que visam avaliar o potencial de geração energética provenientes do mar. A Associação Europeia de Energia Oceânica desenvolveu, em 2010, um roteiro para esse tipo de

energia, que tem potencial de atingir 3,6 GW instalados em 2020 e 188 GW em 2050, o que representaria 0,3% e 15% da demanda projetada para esses respectivos anos (OEE, 2015). Por se tratar de uma energia renovável e de imenso potencial, várias linhas de estudos estão sendo desenvolvidas para que se torne justificável e viável a construção e testes de protótipos, tanto na costa (*shoreline*), próximos à costa (*nearshore*) e em alto mar (*offshore*).

Existem cinco formas de energias oceânicas (Soerensen e Weinstein, 2008): energia de ondas (extraída diretamente das ondas); energia de maré (extraída da sua componente cinética e do seu potencial, por meio de barragens); energia de correntes (extraída da energia cinética das correntes marinhas); energia do gradiente de temperatura (diferencial de temperatura entre as águas quentes superficiais e as geladas águas profundas, por meio de diferentes processos de Conversão de Energia Térmica Oceânica - OTEC); e energia do gradiente de salinidade (aproveita-se a energia osmótica da diferença de salinidade entre a água doce dos rios e a água salgada dos oceanos). A energia proveniente das ondas será abordada nesta introdução.

A conversão da energia das ondas depende da altura da onda, do período de tempo entre os frentes de onda consecutivos, e principalmente do dispositivo que realiza a conversão em energia útil. Os dispositivos costeiros de conversão (*shoreline*) têm vantagem de serem facilmente instalados e ter fácil acesso para manutenção, contudo estão localizados onde as ondas já sofreram perda de energia pelo atrito com o assoalho marinho. Para os dispositivos costeiros, o mecanismo mais utilizado para a conversão de energia das ondas para energia elétrica é o OWC - *Oscillating Water Column* ou Coluna de Água Oscilante. Neste dispositivo o ar fica aprisionado em uma câmara com uma abertura, para sua entrada e saída, e em contato com a superfície do mar. Com a oscilação da superfície do mar é gerada uma pressão que força o ar a se deslocar pela abertura, onde se encontra uma turbina que se movimenta com a entrada e a saída do ar. A Figura 1 (adaptada de Trujillo e Thurman, 2011) ilustra o funcionamento deste dispositivo.

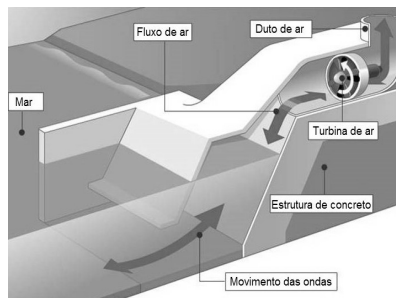


Figura 1 – Esquemática de um dispositivo de geração costeiro do tipo OWC

A primeira instalação a utilizar essa tecnologia em escala comercial está em Islay, na Escócia. A oscilação da coluna d'água alimenta duas turbinas ligadas a um gerador de 250 kW cada uma. Além desta instalação, que está em operação há mais de 11 anos, há projetos similares em várias localidades do mundo (Falcão e Henriques, 2016).

Outro dispositivo de conversão que pode ser usado na costa é o de galgamento. Estes dispositivos contêm reservatórios que são preenchidos pelas ondas e fazem subir o nível acima da média do oceano. A água é então libertada e a gravidade faz com que esta caia em direção ao oceano. A energia originada pela queda da água é usada para fazer rodar uma turbina hidroelétrica. Geralmente estes dispositivos são estruturas de grandes dimensões para viabilizar um reservatório com capacidade suficiente de armazenamento. Eles podem ser flutuantes ou fixos à costa com o reservatório em terra. A Figura 2 (adaptada de Bevilacqua e Zanuttigh, 2011) ilustra o dispositivo de galgamento.

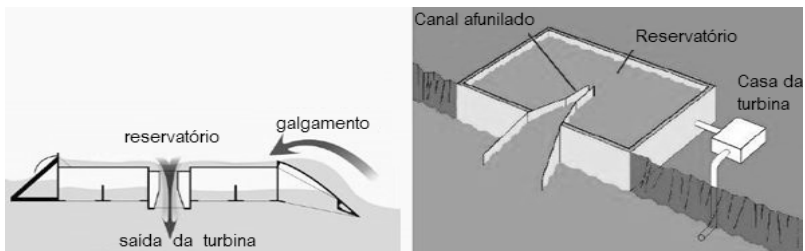


Figura 2 – Dispositivos de galgamento: *offshore* (esquerda) e na linha de costa (direita)

O exemplo mais comum de dispositivo de conversão da energia é o Pelamis (Dalton et al, Palha et al, 2010). “Trata-se de um dispositivo *offshore* para locais com profundidades maiores do que 50 m. O Pelamis é um dispositivo do tipo progressivo, desenvolvido pela *OceanPower Delivery Ltd* (Escócia). Carvalho (2010) define os dispositivos progressivos como “sistemas alongados com uma dimensão longitudinal da ordem de grandeza do comprimento de onda e estão dispostos no sentido de propagação da onda, de modo a gerarem um efeito de bombeamento progressivo, associado à passagem da onda”. O Pelamis consiste em uma estrutura articulada semi-submersa composta por diferentes módulos cilíndricos unidos por juntas flexíveis. O primeiro local a utilizar essa tecnologia foi o parque de Aguçadoura em Portugal, com 2,25 MW instalados. Esta instalação foi inaugurada em setembro de 2008 com três dispositivos Pelamis, mas cessou posteriormente sua operação por problemas operacionais e dificuldades financeiras (Smith et al, 2012). A Figura 3 mostra o esquema de funcio-

namento desta tecnologia.

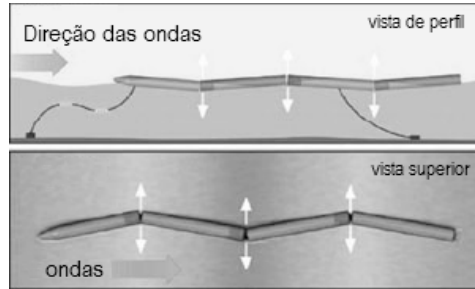


Figura 3 – Vista aerea e lateral do dispositivo

Estruturas costeiras projetadas para a contenção das ondas marinhas, como espigões e quebra-mares podem ser aproveitadas para produzir energia elétrica. No Brasil foi instalada a primeira usina da América Latina movida pela força das ondas do mar, instalada no Porto de Pecém, no litoral cearense, a cerca de 60 km da capital Fortaleza. Foi desenvolvida pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). O equipamento consiste em braços mecânicos com um flutuador no extremo. Estes braços mecânicos estão apoiados num quebra-mar. Com o movimento das ondas, os flutuadores fazem com que os braços se movimentem, funcionando como pistões para pressurizar água doce. A água pressurizada é armazenada num acumulador conectado a uma câmara hiperbárica, e posteriormente forma um jato que movimenta uma turbina (Costa, 2004). A Figura 4 mostra esta usina (COPPE, 2012).



Figura 4 – Usina de ondas no porto de Pecém

A usina piloto de Pecém está, na atualidade, desativada. Existe um novo projeto de usina no Brasil, dessa vez em terras cariocas. A parceria entre FURNAS e a empresa *Seahorse Wave Energy* propõe

uma usina *offshore* a 14 km da costa com capacidade de 100 kW – o dobro da usina cearense. A geração de energia da usina se dará a partir da movimentação vertical de um flutuador de onze metros de altura e 4,5 metros de diâmetro, impulsionado pelas ondas do mar.

## 1.2 Avaliação do potencial nacional: o Programa Nacional de Boias

A ausência de dados experimentais suficientes é um condicionante para a modelagem do comportamento das ondas no litoral brasileiro. Isto faz com que seja necessário recorrer a modelos de simulação matemática, que tomam como entradas outros dados climáticos secundários, por exemplo a velocidade do vento na superfície do mar. O CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos usa o modelo de ondas oceânicas de terceira geração WAVEWATCH 2.22, apropriado para águas acima de 40 metros de profundidade. Este modelo está orientado para o auxílio na navegação, mas não para avaliar o potencial energético das ondas na linha da costa. Contudo, o modelo WAVEWATCH III (WW3) já foi usado para avaliar o potencial das ondas no litoral do Brasil (Carvalho, 2010). Dentre os poucos trabalhos com dados experimentais, destaca Assis (2010) que analisou o potencial energético no litoral do Rio Grande do Sul a partir dos dados de um ondógrafo tipo boia fundeado durante 35 meses consecutivos.

O Programa Nacional de Boias (PNBOIA) consiste em uma rede de boias de deriva e boias fixas fundeadas na região costeira, rastreadas por satélite, que visa o fornecimento de dados meteorológicos e oceanográficos em tempo real. O PNBOIA tem propiciado a produção de conhecimento científico e contribuído para o fornecimento de previsões oceanográficas e meteorológicas. Pela primeira vez, estes dados são usados para estimar o potencial de produção de energia elétrica. Os dados coletados numa estação do PNBOIA durante 10 meses consecutivos, em períodos de uma hora, foram usados como base para elaborar um modelo matemático do potencial energético nesse local.

## 2. MÉTODOS

### 2.1 Obtenção dos dados

Os dados de ondas do litoral norte da Bahia são medidos por um perfilador acústico de efeito *Doppler* - ADCP *Work Horse Sentinel* de 600 kHz com medidor de onda direcional - *Waves Array* acoplado, da marca *Teledyne RD Instruments*. O equipamento está instalado na Praia do Forte, latitude de 12°36' 13.8" S e longitude de 37°58' 31.8" W,

com fundeio na plataforma sob a isóbata de 32m. O equipamento foi fixado ao fundo embutido em uma estrutura anti-arrasto de concreto. A Figura 5 (Teledyne, 2013) esquematiza o funcionamento deste sistema de medição.

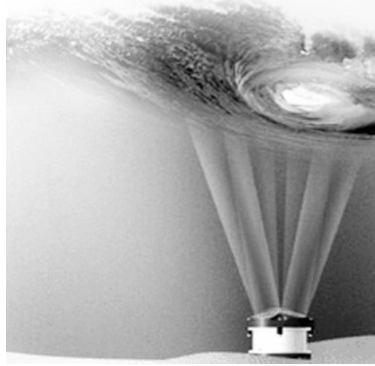


Figura 5 – Esquema do perfilador acústico de efeito *Doppler*

Este instrumento mede a altura e o período das ondas na superfície. As medições são feitas em intervalos de 3 horas em modo de “*burst sampling*” com frequência de 2Hz. Os dados são armazenados na memória do dispositivo e recuperados mensalmente por mergulhadores.

## 2.2 Fórmula da potência

A potência que pode ser obtida de um frente de ondas está determinada pela densidade da água ( $\rho$ ), o período entre as frentes de onda consecutivos ( $T$ ), e a altura das ondas ( $H$ ). A fórmula da potência pode ser simplificada para obter uma expressão que só depende da altura e do período (Al-Habaibeh, 2010):

$$P = \frac{\rho g}{64\pi} H^2 T \approx \frac{1}{2} H^2 T \quad (1)$$

A equação (1) calcula a potência por metro de frente de onda (kW/m) para a altura  $H$  em metros e o período  $T$  em segundos.

## 2.3 Desenvolvimento do modelo de redes neurais

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) são uma técnica de modelagem empírica desenvolvida por McCulloch e Pitts (1943) com o

objetivo de simular o funcionamento do sistema nervoso humano. A modelagem por RNA é um ramo da inteligência artificial que nas últimas duas décadas se disseminou na engenharia devido à sua capacidade de descrever o comportamento não linear de um sistema, característica bastante comum na engenharia.

O objetivo desta seção é desenvolver um modelo matemático confiável, baseado em RNAs, para a caracterização do potencial energético das ondas num local, do qual se tem uma série de dados experimentais (altura e período). Este modelo deve possuir três entradas (mês, dia e hora) e uma única saída: a potência nesse instante, expressada em kW/m e calculada segundo (1). Este modelo oferece, portanto, uma estimativa da potencial produção de energia em cada hora e em cada dia do ano.

É proposta uma estrutura “*nonlinear autoregressive exogenous model*” (NARX). Tal estrutura consiste na retroalimentação das entradas passadas na rede em forma de entradas na retroalimentação. Desta forma, o modo utiliza o valor das variáveis passadas para realizar as previsões futuras, assim como o modelo de um sistema dinâmico conforme representado em (2):

$$y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n_{ty}), u(t-1), u(t-2), u(-n_{tu})) \quad (2)$$

A estrutura final da rede neuronal pode ser então representada conforma a Figura 6. Observa-se que um determinado número de passadas respostas é retroalimentado na camada de entradas do modelo de modo a realizar a predição seguinte.

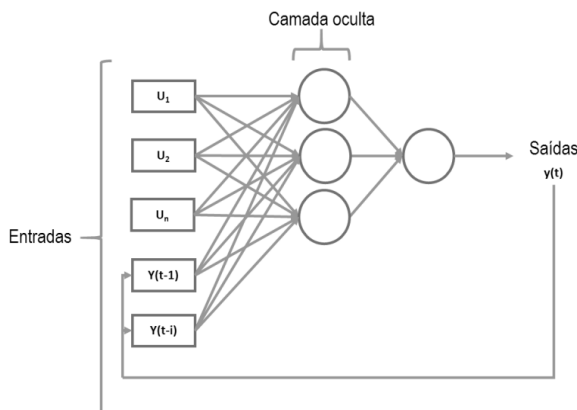


Figura 6 – Estrutura escolhida para o modelo de redes neurais: modelo NARX

Uma vez tendo a estrutura do modelo definida é preciso definir a arquitetura final. A arquitetura contempla o número de camadas intermediárias do modelo, o tipo das funções de ativação de cada neurônio, o número de camadas intermediárias, o número de neurônios nas camadas intermediárias e, por fim, a seleção do melhor modelo. O número de neurônios da camada intermediária de uma rede neural é o ponto crucial da estruturação do modelo, uma vez que ele irá determinar a quantidade de parâmetros a serem estimados na etapa de treinamento. Um número excessivo de neurônios poderá levar a um sobre-ajuste, ou seja, à modelagem indesejada de ruídos ou dados espúrios, como mencionado anteriormente. Já um número menor do que o necessário pode prejudicar a qualidade da predição do modelo. No presente trabalho a validação cruzada dinâmica foi utilizada de modo a selecionar o número ótimo de neurônios na camada intermediária do modelo, resultando 5 neurônios. Uma vez selecionado o número de neurônios da camada intermediária, resta o treinamento e validação da estrutura final. O treinamento consiste na estimação dos parâmetros da rede: pesos e bias, calculados por meio de um problema de otimização. Foi usado o algoritmo “*backpropagation*” de Levenberg-Marquardt. A técnica de “*early stopping*” foi implementada para evitar o problema de sobreajuste dos dados por parte do modelo. A técnica consiste em parar o treinamento após um número sucessivo de iterações em que o erro de validação aumenta. As definições gerais do modelo final encontram-se apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Características do modelo em RNA proposto

	Parâmetros do Modelo
Número total de neurônios avaliado	15
Número total de treinamentos	15
Número ótimo de neurônios	5
Performance (mse)	8,83
Função de transferência na primeira camada	Sigmoide - tangente hiperbólica
Função de transferência na camada de saída	Função linear

## 2.4 Cálculo do erro do modelo

Para medir a precisão do modelo é calculado o erro em cada ponto, considerado como a diferença entre os valores reais e os preditos (erro = potência real – predita) conforme representado em (3):

$$Erro(\%) = \left| \frac{C_t - F_t}{C_t} \right| \cdot 100 \quad (3)$$



onde  $P_t$  é o valor real (a potência medida no instante  $t$ ) e  $F_t$  é o valor previsto para esse instante. Posteriormente, todos os erros dos pontos são classificados num histograma, de modo a visualizar sua distribuição de frequência.

### 3. RESULTADOS

Foi usada uma base de dados compreendendo 1919 medidas de altura e período, que originaram os correspondentes valores de potência. Os dados experimentais obtidos diretamente no local registraram uma potência entre 3 e 65 kW/m. Energia total incidente durante os 10 meses de 52,2 MWh por metro de frente de onda. Uma pequena parte dos dados foi aplicada no desenvolvimento do modelo (treinamento da rede neural). Posteriormente, o modelo foi usado para prever a potência em todos os pontos (validação do modelo). O resultado da validação é apresentado na Figura 7:

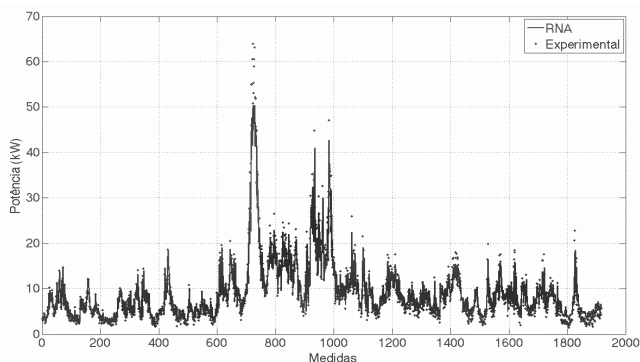


Figura 7 – Validação do modelo: dados experimentais VS modelo em RNA

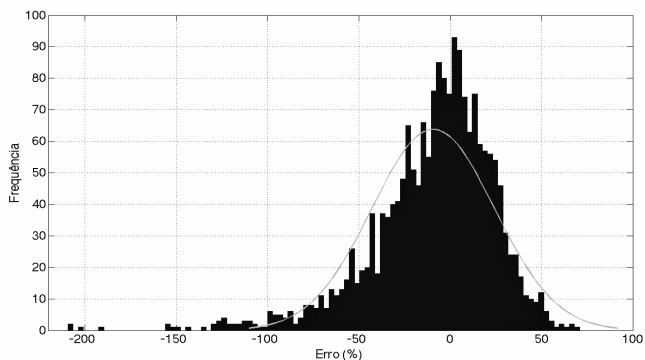


Figura 8 – Distribuição dos erros cometidos pelo modelo

O modelo matemático usa os dados disponíveis, medidos por um ondógrafo no próprio local, para treinar uma rede neural e estimar a potência em cada hora do dia durante 10 meses. Após 15 treinamentos, conseguiu estimar o potencial energético do local com um erro médio de  $\pm 9,25\%$ . A precisão deste modelo é significativa e permite realizar um estudo confiável de viabilidade da implantação de uma usina de ondas, em um local em que se tenham alguns registros temporais de altura e período das ondas. Com esses dados, o modelo treinará uma rede neural e calculará o valor médio da energia gerada ao longo da vida útil do empreendimento.

#### **4. CONCLUSÕES**

As ondas são uma fonte de energia promissora, embora intermitente e pouco previsível. O aproveitamento desta fonte renovável tem duas frentes de trabalho: de um lado, o desenvolvimento de dispositivos de conversão eletromecânica cada vez mais econômicos e eficazes. De outro, desenvolver métodos para avaliar com precisão o potencial energético de possíveis localizações de usinas. Os modelos de previsão de ondas disponíveis realizam previsões com alguns dias de antecedência baseadas na velocidade do vento e outros parâmetros. Estes modelos computacionais possuem interessantes aplicações no monitoramento climático e na navegação. Para avaliar o potencial energético dos locais mais promissores, uma abordagem mais conveniente é o registro de medições mediante ondógrafos e o posterior tratamento estatístico desses dados. O modelo matemático proposto, baseado em RNAs, conseguiu caracterizar o comportamento desta fonte renovável no local com um erro médio de 9,25%.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AL-HABAIBEH, A., SU, D., MCCAGUE, J., KNIGHT, A., "An innovative approach for energy generation from waves", *Energy Conversion and Management* 51(8):1664-1668, 2010.

ASSIS, L.E., "Avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

BEVILACQUA, G., ZANUTTIGH, B. "Overtopping Wave Energy Converters: General Aspects and Stage of Development", Universidade de Bolónia, 2011.

CARVALHO, J.T., “Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro”, Dissertação de Mestrado, Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais – INPI, 2010.

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, “Balanço do mar se transforma em energia elétrica no litoral do Ceará”, Rio de Janeiro, 2012.

COSTA, P.R., “Energia das ondas do mar para geração de eletricidade”, Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

DALTON, G.J., ALCORN, R., LEWIS, T., “Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America”, *Renewable Energy* 35(2):443-455, 2010.

FALCÃO, A.F.O., HENRIQUES, J.C.C., “Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review”, *Renewable Energy* 85:1391-1424, 2016.

MCCULLOCH, W.S., PITTS, W., “A Logical Calculus of The Immanent in Nervous Activity”. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4):115–33, 1943.

OEE – Ocean Energy Europe, “Draft Ocean Energy Strategic Roadmap, building ocean energy for Europe”, 2015.

PALHA, A., MENDES, L., FORTES, C.J., BRITO-MELO, A., SARMENTO, A., “The impact of wave energy farms in the shoreline wave climate: Portuguese pilot zone case study using Pelamis energy wave devices”, *Renewable Energy* 35(1):62-77, 2010.

SMITH, H.C.M., PEARCE, C., MILLAR, D.L. “Further analysis of change in nearshore wave climate due to an offshore wave farm: An enhanced case study for the Wave Hub site”, *Renewable Energy* 40(1):51-64, 2012.

SOERENSEN, H.C., WEINSTEIN, A. “Ocean Energy: Position paper for IPCC”. IPCC Socping Conference on Renewable Energy, Lüberck, Alemanha, 2008.

TELEDYNE - Teledyne RD Instruments, “Workhorse Nemo Datasheet”, 2013.

TRUJILLO, A.P., THURMAN, H.V., “Essentials of Oceanography”. 10<sup>a</sup> ed., Prentice Hall. 2011.

