

CONSIDERAÇÕES SOBRE O CLIMA DE ONDAS NA COSTA BRASILEIRA PARA O PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE PARQUES EÓLICOS OFFSHORE

Claudio F. Neves¹ , Ricardo C. Guimarães² , Laura Aguilera³

1,2 Programa de Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

3 WavEC Offshore Renewables, Portugal

1 neves@oceanica.ufRJ.br 2 ricardoguimaraes@oceanica.ufRJ.br 3 laura.aguilera@wavec.org

RESUMO

O projeto de aerogeradores em parques eólicos offshore exige o conhecimento do clima de ondas na região para o correto dimensionamento das estruturas. O artigo aborda a interação das ondas com o parque como um todo, considerando um conjunto de monopilares. A múltipla difração das ondas e suas respectivas interações produzem um efeito adicional, gerando ondas de baixa frequência, que podem interferir no processo de construção e de operação do parque eólico. Além disso, a presença do parque irá influenciar a forma como as ondas atingirão a linha de costa, não importando a que distância estejam posicionados. Este efeito não é devidamente considerado atualmente no processo de licenciamento dos parques offshore. Algumas observações *in situ* e relatos sugerem efeitos sobre o transporte de sedimentos associado às ondas e à interação turbulenta entre as correntes oceânicas e as estruturas de suporte aos aerogeradores. O artigo conclui com algumas considerações sobre mudança do clima e possíveis orientações para o projeto de parques eólicos offshore no Brasil.

Palavras-chaves:

Interação Ondas-Monopilares; Transmissão de ondas; Espalhamento de ondas; Impactos costeiros.

ABSTRACT

Knowledge about the local wave climate is needed for the design of all individual structures within an offshore wind farm. The manuscript calls attention to the interaction of a wave field with the entire farm, considering the interaction between incident waves and the diffracted/scattered waves by individual monopiles. The complex pattern, which results from the multiple wave-wave interactions with the ensemble of monopiles, generates low frequency waves which may interfere with the construction and the operation of the wind farm. Further, as the waves pass through the structures, an undesired effect may reach the coast, regardless how distant the farm is from the shoreline. Results show evidence of sediment transport associated to the waves and to the turbulent interaction between current and the structures. The discussion concludes with remarks about climate changes and a few guidelines for the design of offshore wind farms in Brazil.

Keywords:

Wave-Monopiles interaction; Wave transmission; Wave scattering; Coastal impacts

1. INTRODUÇÃO

A Universidade Federal de Pernambuco instalou em 1992 um projeto piloto para geração eólica de energia na Ilha de Fernando de Noronha, que funcionou até 2009, quando foi destruído por um raio. A exploração comercial ou industrial de energia eólica continental no Brasil possui dois marcos iniciais: em 1998, na Região Nordeste, no Estado do Ceará; e em 2006, na Região Sul, no Estado do Rio Grande do Sul, onde viria a ser instalado o maior parque eólico do Brasil até 2012. Posteriormente parques eólicos se expandiram para outros Estados da Região Nordeste. A zona costeira foi privilegiada com as primeiras instalações, considerando que os ventos seriam tão mais favoráveis, quanto mais perto do mar os aerogeradores se posicionassem. Eventualmente, alguns parques se situaram demasiadamente próximos ao mar.

A instalação de parques eólicos na zona costeira coloca, porém, alguns desafios bastante específicos, que em geral não existem em parques continentais mais interiorizados. No caso do Ceará, os parques eólicos de Taíba e de Canoa Quebrada foram pioneiros ao serem instalados em campos de dunas. A mobilidade das dunas representava um desafio importante, pois exigia a limpeza das estradas de acesso às torres. A presença de sedimentos finos em suspensão no ar provoca abrasão nas pás; além disso, a maresia combinada com chuvas esparsas seguida de sol, faz com que os sedimentos finos fixem uma fina crosta na superfície das pás dos rotores, influenciando o seu desempenho. Insetos que se chocam com as pás provocam um efeito cumulativo associado à fixação de grãos de areia nas pás, o que exige limpeza de manutenção mais recorrente. A maresia também provoca a corrosão das torres, exigindo proteção especial. Como exemplos de parques eólicos costeiros, citam-se aqueles nos Lençóis Maranhenses, no delta do Parnaíba, ao longo do litoral cearense, no litoral setentrional potiguar, na embocadura do rio Paraíba do Sul na costa norte-fluminense, e na planície costeira nordeste gaúcha, na região de Osório.

Na Região Nordeste, a segunda geração de parques eólicos foi gradualmente interiorizada, sendo instalados em sítios mais elevados. Hoje pode-se dizer que exista uma terceira geração, com aerogeradores mais potentes, rotores maiores, em grandes extensões de terrenos localizados especialmente no bordo das chapadas e serras (e.g., Araripe, Ibiapaba, Borborema, Caetité) nos Estados de Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba e Bahia.

A quarta geração dos parques eólicos no Brasil será a instalação offshore (Figura 1). Tal decisão se justifica tecnicamente pela constância de ventos, especialmente dos ventos alísios na região equatorial, e pela maior intensidade dos ventos ao largo dos continentes. À parte das condições ambientais, porém, existe um diferencial favorável no caso brasileiro, que é a base, o conhecimento e a experiência sólida da engenharia, da geologia e da oceanografia brasileira, adquiridas ao longo de cinco décadas de exploração de petróleo no mar. Seja no caso das primeiras plataformas de petróleo, em águas com profundidade da ordem de 100 m e apoiadas no fundo do mar, seja nas situações mais recentes da exploração do pré-sal em profundidades da ordem de 1.000 m, com fixação do tipo *tension leg* ou estaiadas, a exploração eólica offshore se beneficiará dos conhecimentos e técnicas básicas de sondagens, da construção das fundações, da descrição oceanográfica, do dimensionamento estrutural, que possuem alguma semelhança com as técnicas já desenvolvidas para a exploração de petróleo e gás no mar. No entanto, a instalação de monopilares ou de aerogeradores flutuantes apresenta outros desafios construtivos, especialmente no que se refere à instalação das nacelles e montagem dos rotores em alturas da ordem de 100 m em mar aberto, na presença combinada de ondas, correntes e ventos.

A transferência da energia elétrica para terra e a instalação de uma rede de cabos sobre o fundo marinho em profundidades entre 20 e 50 m precisa levar em conta aspectos sedimentológicos, tais como a mobilidade dos sedimentos de fundo sob ação de ondas e correntes, a sazonalidade das condições oceanográficas e a evolução morfodinâmica da linha de costa e do fundo, muito intensa ao longo da costa Nordeste do Brasil. Tais características ambientais impõem condicionantes para o dimensionamento estrutural, assim como para as atividades de manutenção e operação corrente.

Parques marinhos necessitam também de instalações em terra para a fabricação, estocagem e embarque, em portos especializados, das torres e dos rotores. A localização desses portos de apoio, que servem tanto para a fase construtiva quanto para a fase de operação e serviços de manutenção, precisa seguir aspectos técnicos de engenharia costeira. No caso da Região Nordeste onde o transporte litorâneo de sedimentos por ações de ondas é bastante intenso, da ordem de 10^6 m³/ano, a linha costeira sofre grandes variações, da ordem de 100 m, em escala de tempo de 10 anos (VALENTINI 1994; TEIXEIRA et al. 2019).



Figura 1: Locais de possíveis parques eólicos marinhos com registro no IBAMA. (Fonte: IBAMA)

O principal agente dinâmico marinho na zona costeira é a onda. Portanto, é fundamental para a indústria de geração eólica de energia uma correta caracterização do padrão de ondas. Quão mais energéticas forem as ondas, mais significativas também serão as alterações morfológicas naturais do fundo marinho e da linha de costa (aonde chegam os cabos de conexão entre as instalações em terra e os aerogeradores). Tendo em vista a extensão em planta dos parques eólicos, podem existir diferenças de magnitude das alturas de ondas e da direção de incidência, em decorrência da variação de profundidade e da presença de correntes marinhas (e.g., circulação oceânica de plataforma, correntes de maré).

Evidentemente, os projetos das diversas estruturas (monopilares, instalações auxiliares, fundações) também serão determinados pelas características do clima de ondas (altura, período e direção) e da intensidade das correntes. A combinação dessas forças hidrodinâmicas, da ação do vento e dos movimentos induzidos pelo rotor em operação gera esforços dinâmicos que são transmitidos às fundações. As características do solo marinho, numa faixa de 50 a 100 m, precisam ser estudadas cuidadosamente, considerando que os locais indicados na Figura 1 foram selecionados com base em condições eólicas apenas, mas uma análise preliminar sob o ponto de vista geológico vai indicar que são pontos próximos a estuários afogados (Parnaíba, Jaguaribe, Paraíba do Sul, embocadura da Lagoa dos Patos).

Finalmente, quando um trem de ondas atravessa um parque eólico, ele sofre mudanças na medida em que as ondas são difratadas e interagem entre si. Por um princípio básico de Mecânica, se as ondas provocam forças sobre um monopilar, este também provocará uma força sobre a onda incidente, alterando o transporte de quantidade de movimento. Se esta ação individual de um monopilar sobre a onda for integrada em todo o campo, haverá certamente uma considerável influência do conjunto no transporte de quantidade de movimento transportado pelas ondas. Logo, haverá uma variação na quantidade de movimento (e na energia) presente no campo de ondas que, na ausência do parque eólico, atingiria a zona de arrebatamento na praia. Este efeito sobre a costa foi bem identificado em grandes instalações ao largo de mecanismos para geração de energia a partir das ondas (e.g. PALHA *et al.* 2010; RUSU e GUEDES SOARES 2013; GONZALEZ-SANTAMARIA *et al.* 2015). A linha de costa respondeu lentamente à mudança da incidência de energia, provocando erosões e acréscimos indesejáveis em pontos localizados.

2. A DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA DAS ONDAS AO LONGO DA COSTA BRASILEIRA

A costa brasileira se estende ao longo de aproximadamente 8.500 km, abrangendo 37 graus de latitude, com exposição às condições de mar em seis segmentos distintos. Uma subdivisão detalhada da costa brasileira em termos de exposição a diferentes estados de mar e a características morfodinâmicas do litoral é apresentada por Muehe *et al.* (2020), a qual serviu de subsídio para a subdivisão mostrada na Figura 2, adotada no presente trabalho.

O primeiro segmento (I) corresponde à região da foz do rio Amazonas, abrange a costa dos Estados do Amapá e Pará. Devido à pequena pista de vento, à influência da descarga do rio Amazonas, ao fundo lamoso e à largura da plataforma continental, as ondas observadas e previstas pelos modelos numéricos possuem baixa altura. A linha de costa é caracterizada por manguezais e rias.

O segundo segmento (II), se estende da baía de São Marcos, no Estado do Maranhão, ao Cabo Calcanhar, no Estado do Rio Grande do Norte; neste trecho, a linha de costa é exposta tanto às ondas geradas pelos ventos alísios (PIANCA *et al.* 2020) e às ondas produzidas pelas tempestades tropicais em baixas latitudes no Atlântico Norte, nos meses de maio a setembro (verão no Hemisfério Norte), quanto às ondas geradas pelas tempestades extratropicais em altas latitudes durante o inverno no Hemisfério Norte (MELO Fo *et al.* 1995). A linha de costa é bastante dinâmica, como pode ser avaliado através de imagens de satélite (e.g. TEIXEIRA *et al.*, 2021), quantificação do transporte de sedimentos por traçadores (e.g. BANDEIRA; SALIM, 1999) e quantificação a partir de estimativas de ondas (e.g. VALENTINI, 1994). Neste segmento, estão localizadas as áreas 01, 02 e 03 identificadas pelo IBAMA (Figura 1).

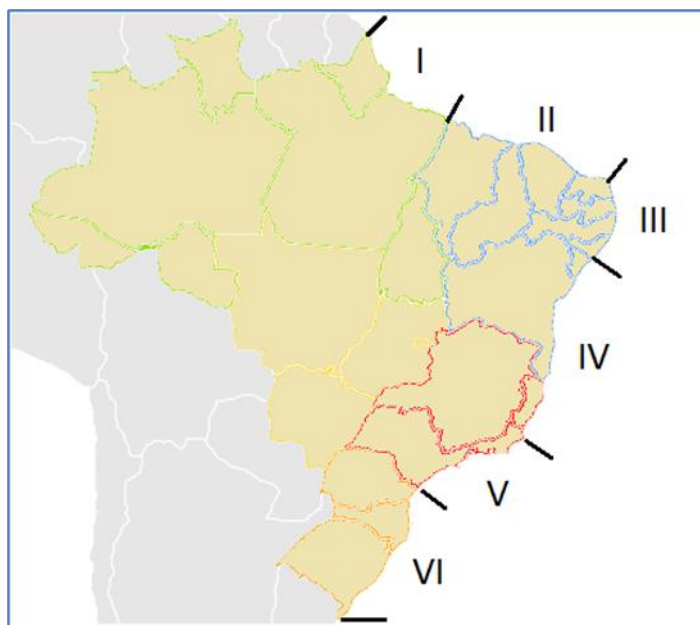


Figura 2: Segmentação da costa brasileira em relação a exposição a ondas e características morfodinâmicas. (Fonte: Autor)

O terceiro segmento (III) corresponde à região do Atlântico Equatorial, que vai do Rio Grande do Norte até Sergipe, onde a presença da Corrente do Brasil e do sistema da Corrente Equatorial influenciam a formação de ondas pelos ventos alísios e o clima de ondas na costa varia com a oscilação sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Este trecho é fortemente afetado por erosão da linha de costa (e.g., AMARO *et al.* 2015) e muito vulnerável à elevação do nível médio do mar como resultado da mudança climática, associado a registros de subsidência, fenômeno que pode estar associado a tectônica de placas ou ao bombeamento de água do subsolo (e.g. NEVES; MUEHE, 1995).

O quarto segmento (IV) vai da foz do rio São Francisco até o Cabo de São Tomé, no Estado do Rio de Janeiro, onde a linha de costa é exposta tanto a ondas de quadrante Nordeste, quanto a ondas de

quadrante Sudeste, as primeiras associadas à posição do Anticiclone do Atlântico Sul que oscila sazonalmente, e as segundas associadas aos Ciclones Extratropicais que se forma em torno de 40 graus de latitude Sul e se propagam até latitudes em torno de 10 graus Sul. Este segmento se caracteriza por estados de mar bicromáticos e bidirecionais, favorecendo a formação de ondas longas (ou de infragravidade) com períodos na faixa de 40 a 400 segundos (e.g., NOGUEIRA, 2014; PARENTE *et al.* 2015). Eventos de erosão costeira são relatados ao longo desse trecho de costa, muito influenciado por alterações no regime de vazões dos rios e de suas capacidades de transporte de sedimentos para o mar (e.g., BANDEIRA *et al.* 2013). Neste segmento, ao largo do Porto do Açú, imediatamente a Norte do Cabo de São Tomé, localiza-se a área 04 do IBAMA (Figura 1).

O quinto segmento (V) vai do Cabo de São Tomé até aproximadamente a região de Cananéia, São Paulo, onde a costa brasileira sofre uma inflexão, alinhando-se numa direção geral Sudeste-Nordeste, com um trecho Leste-Oeste a partir de Cabo Frio até aproximadamente a Ilha de São Sebastião, ficando exposta a ondas provenientes de direções desde Sudoeste até Este Sudeste. Este trecho de costa é caracterizado por ressacas nos meses de outono e inverno no Hemisfério Sul. O Cabo de São Tomé é uma formação arenosa, alimentada por sedimentos que vêm transportados pelas ondas na faixa de arrebentação a Sul do cabo e, para Norte do cabo, onde se situa o Porto do Açú, o cabo ora fornece sedimentos, ora recebe sedimentos, de acordo com a alternância do regime de ondas. Outros processos oceanográficos importantes associados à Corrente do Brasil acontecem nessa região, que reúne as duas principais bacias sedimentares para a produção de petróleo e gás no Brasil, a Bacia de Campos e a de Santos.

Finalmente, o sexto segmento (VI) abrange a Região Sul, entre a baía de Paranaguá e o Arroio Chuí, no extremo Sul do Estado do Rio Grande Sul. Este trecho é caracterizado por fortes ressacas nos meses de inverno no Hemisfério Sul, passagem frequente de ciclones extratropicais, ventos fortes sustentados de 100 km/h e rajadas de até 150 km/h, e grandes oscilações de temperatura (e.g. EVANS e BRAUN 2012). Variações de nível do mar denominadas marés meteorológicas, com amplitude da ordem de 1m a 2m, são frequentes de ocorrer nesse trecho de costa, trazendo impactos importantes sobre a zona costeira, como inundações e erosão de praias, além da ação de ondas sobre casas próximas à orla, estruturas portuárias, obras de proteção costeira e a operação da monobóia em Tramandaí (RS). A área 05 do IBAMA (Figura 1) situa-se neste segmento. Nesta região também aconteceu o primeiro furacão registrado na costa brasileira, próximo à Ilha de Santa Catarina, em 2004. Neves e Aguilera (2021) apresentam uma listagem de 17 ocorrências de tempestades subtropicais e tropicais entre 2004 e 2021, ocorridas no Atlântico Sul, na plataforma continental dos segmentos V e VI.

Guimarães (2020) analisou as distribuições de alturas significativas (H_s) e de períodos de pico espectral (T_p) ao longo de toda a Zona Econômica Exclusiva (ZEE) do Brasil e área parcial do Oceano Atlântico Sul. Para esta área, o autor caracterizou a disponibilidade de energia das ondas (Figura 3), que é uma informação importante a ser considerada no dimensionamento das estruturas para geração de energia eólica, assim como no planejamento das operações de instalação dos aerogeradores. Nas Regiões Sul e Sudeste, correspondendo aos segmentos V e VI, são observadas as maiores alturas significativas, ultrapassando o valor médio de 2m de altura. Entre o cabo de São Tomé e o cabo Calcanhar, segmentos II e III, o valor médio de altura significativa situa-se na faixa entre 1,2 m e 1,6 m na área mais próxima à costa e entre 1,6 m e 1,8 m nas áreas ao largo. Os valores decrescem em direção a Norte e, na costa setentrional da Região Nordeste, ocorreriam os menores valores, embora, excepcionalmente, ondas de longo período atinjam este trecho da costa, o que é importante para fins de dimensionamento de estruturas.

As projeções de ondas para a costa brasileira, produzidas com modelos de reanálise apresentadas na literatura, restringem-se a uma área oceânica demasiadamente limitada em latitude e longitude. No caso do segmento litorâneo II, existe comprovadamente a incidência de ondas extremas durante o inverno no Hemisfério Norte (MELO F^o *et al.*, 1995; PAULA *et al.*, 2015), registradas no litoral do Ceará, onde vários empreendimentos registraram interesse de instalação (áreas 01, 02 e 03 do IBAMA, Figura 1). A Figura 4 indica as áreas oceânicas potenciais para geração de ondas que atinjam os portos de Pecém (segmento II) e de Rio Grande (segmento VI), lembrando que as ondas no mar (*i.e.*, ondas de vento, tsunamis) propagam-se ao longo de grandes círculos.

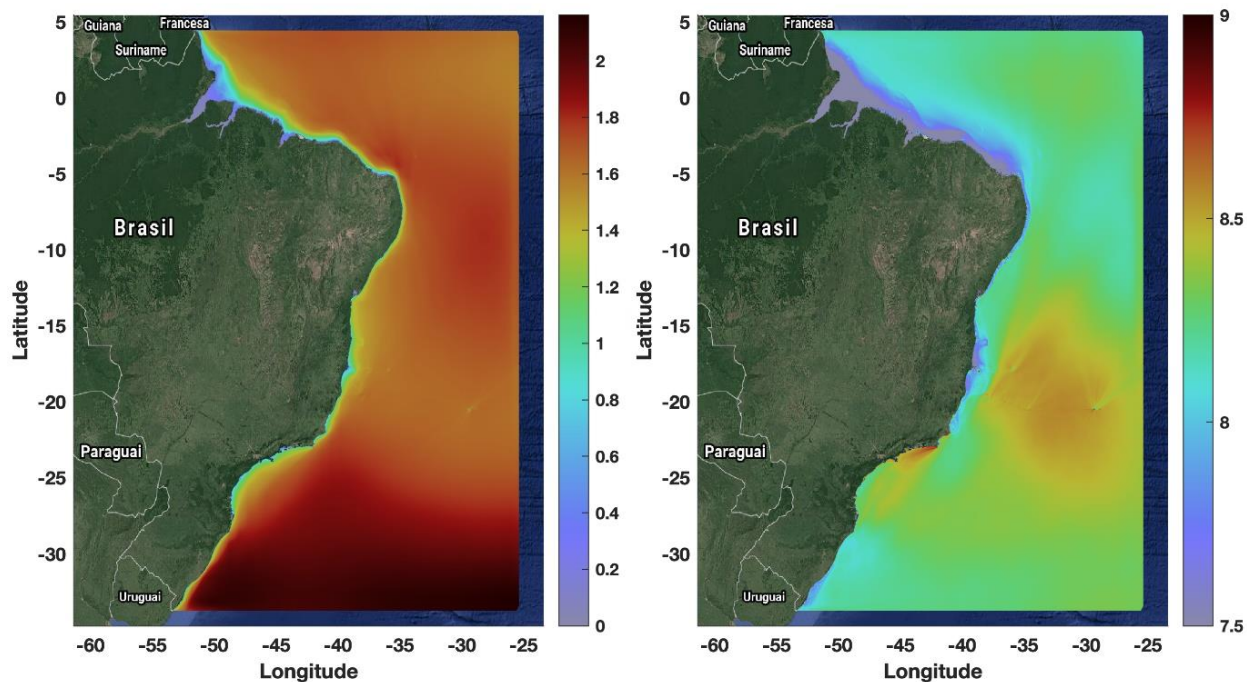


Figura 3: Clima de ondas na costa brasileira: à esquerda, altura significativa (escala de valores em metros); à direita, período de pico espectral (escala de valores em segundos). (Fonte: GUIMARÃES 2020)

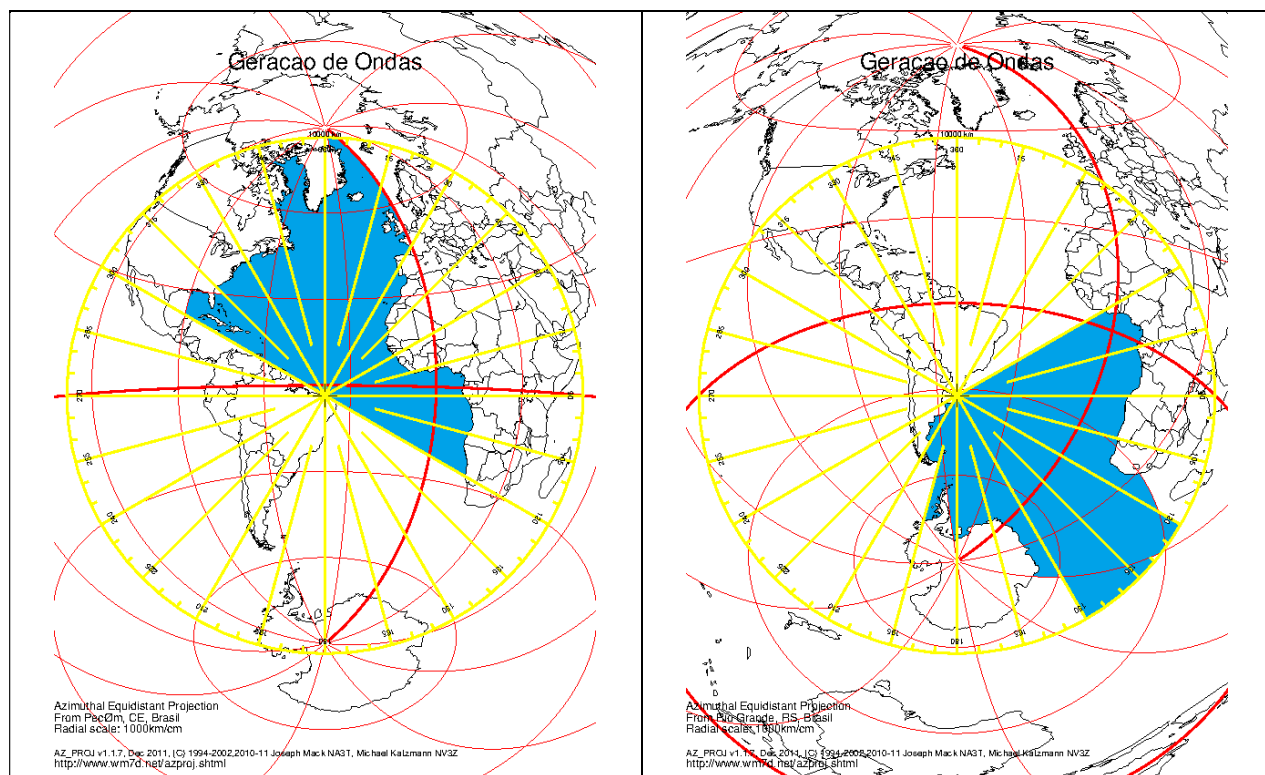


Figura 4: Áreas de geração de ondas: Porto do Pecém (esquerda); Porto de Rio Grande (direita). (Fonte: Autor; Great Circle Map Generator)

3. A INTERAÇÃO DE ONDAS, VENTOS E CORRENTES COM PAQUES EÓLICOS

O dimensionamento de estruturas para parques eólicos quanto às cargas hidrodinâmicas das ondas considera, em geral, apenas o efeito de uma onda monocromática caracterizada por sua altura significativa e período de pico (ou a ação de um espectro de ondas unidirecional). A estrutura pode ser um cilindro (monopilar) ou uma estrutura estaiada com forma mais complexa. Supõe-se também que o espaçamento entre aerogeradores isolados seja suficientemente grande para que uma estrutura não interfira com as demais, dentro de um mesmo parque eólico. Aguilera (2020) investigou a propagação de ondas monocromáticas através de arranjos de 4, 16, 25, 50 e 70 monopilares cilíndricos, cada qual com diâmetro de 10 m, espaçados de 300 m x 800 m, em profundidade de 10 m, utilizando o modelo WAMIT. Os períodos de onda variaram entre 6 e 14 s e foram investigadas diferentes direções de incidência das ondas. Aguilera, Rosman e Neves (2020) apresentaram detalhadamente a diferença que existe entre um cilindro isolado e quatro cilindros. Para um arranjo de 70 monopilares (14 x 5), a Figura 5 mostra a diferença que existe no padrão de alturas de ondas entre os monopilares no caso de ondas com 6 s e 14 s, questionando seriamente a hipótese de não interferência. Os resultados de Aguilera (2000) não corroboram as conclusões de McCombs *et al.* (2014), que utilizaram o modelo SWAN, e citam outros trabalhos que utilizam o mesmo modelo numérico para propagação de ondas. Observe-se, porém, que o SWAN é um modelo espectral, o qual, ao contrário do WAMIT, não tem resolução na fase da onda e, por este motivo, não considera os efeitos das possíveis interações onda-onda no interior do parque eólico.

A direção de incidência da onda se mostra importante no estudo da difração e como o campo de ondas percebe os obstáculos. O projetista, porém, define o espaçamento entre monopilares considerando apenas as características do campo do vento. Para um observador externo, que utiliza a superfície do oceano como referência, o parque teria um padrão geométrico regular. A eficiência energética estaria relacionada apenas à direção do vento, como mostra a Figura 6. No entanto, a direção das ondas varia ao longo do tempo, pois a ondulação (o *swell*) não está relacionada ao vento local. Três efeitos importantes devem ser observados. Em primeiro lugar, o espaçamento entre monopilares que é percebido pelas ondas depende da direção de incidência e do período da onda (Figura 7): o comprimento da onda varia com o quadrado do período da onda, portanto quanto maior o período, a distância entre monopilares torna-se menor, se medida em comprimentos de onda. Em segundo lugar, a difração ou o espalhamento das ondas pelas estruturas do parque eólico provoca padrões internos (Figura 6) que podem se combinar com os esforços induzidos pelo vento e com as oscilações naturais das estruturas. Efeitos de segunda ordem, relacionados à não linearidade das ondas de gravidade, precisam ser melhor investigados no caso de parques eólicos, apesar da distância entre as estruturas, conforme demonstrado em (AGUILERA, 2020). Em terceiro lugar, esforços cortantes e momentos sobre as fundações passam a variar no tempo e em orientação, gerando respostas diferenciadas do solo, que em geral não são consideradas em estudos geotécnicos básicos.

Uma situação mais complexa é a ocorrência de um estado de mar bicromático e bidirecional. Souza e Silva *et al.* (2022) descreveram algumas propriedades não lineares de segunda ordem relacionadas às interferências subtrativas entre duas ondas livres com frequências distintas. Tal condição é comum de acontecer no segmento IV (Estados do Rio de Janeiro e do Espírito Santo), onde existem registros para licenciamento no IBAMA. A interação gerará uma oscilação forçada com frequência igual à diferença entre as frequências das ondas livres; portanto seria possível a formação de ondulações na banda de infragravidade (de 0,004 Hz a 0,04 Hz).

Correntes de maré, ondas de plataforma ou correntes oceânicas no bordo da plataforma continental interagindo com as estruturas do parque eólico adicionariam um elemento novo ao estudo da estabilidade das estruturas e aos efeitos que poderiam acontecer dentro da área do parque. A Figura 8 mostra a pluma de sedimentos observada em imagens de satélite do London Array, mas o mesmo fenômeno foi observado em outras localidades (VANHELLEMONT; RUDDICK 2014; HASAGER *et al.* 2015). Em águas mais profundas, a presença de vórtices na Corrente do Brasil ou a ocorrência de ondas de plataforma, induziria necessariamente esforços e movimentos das estruturas dos aerogeradores. No caso dos Grandes Lagos americanos, McCombs *et al.* (2014) confirmaram a influência do parque eólico no padrão de correntes e circulação induzida por vento, indicando a necessidade de incluir a influência das correntes de marés.

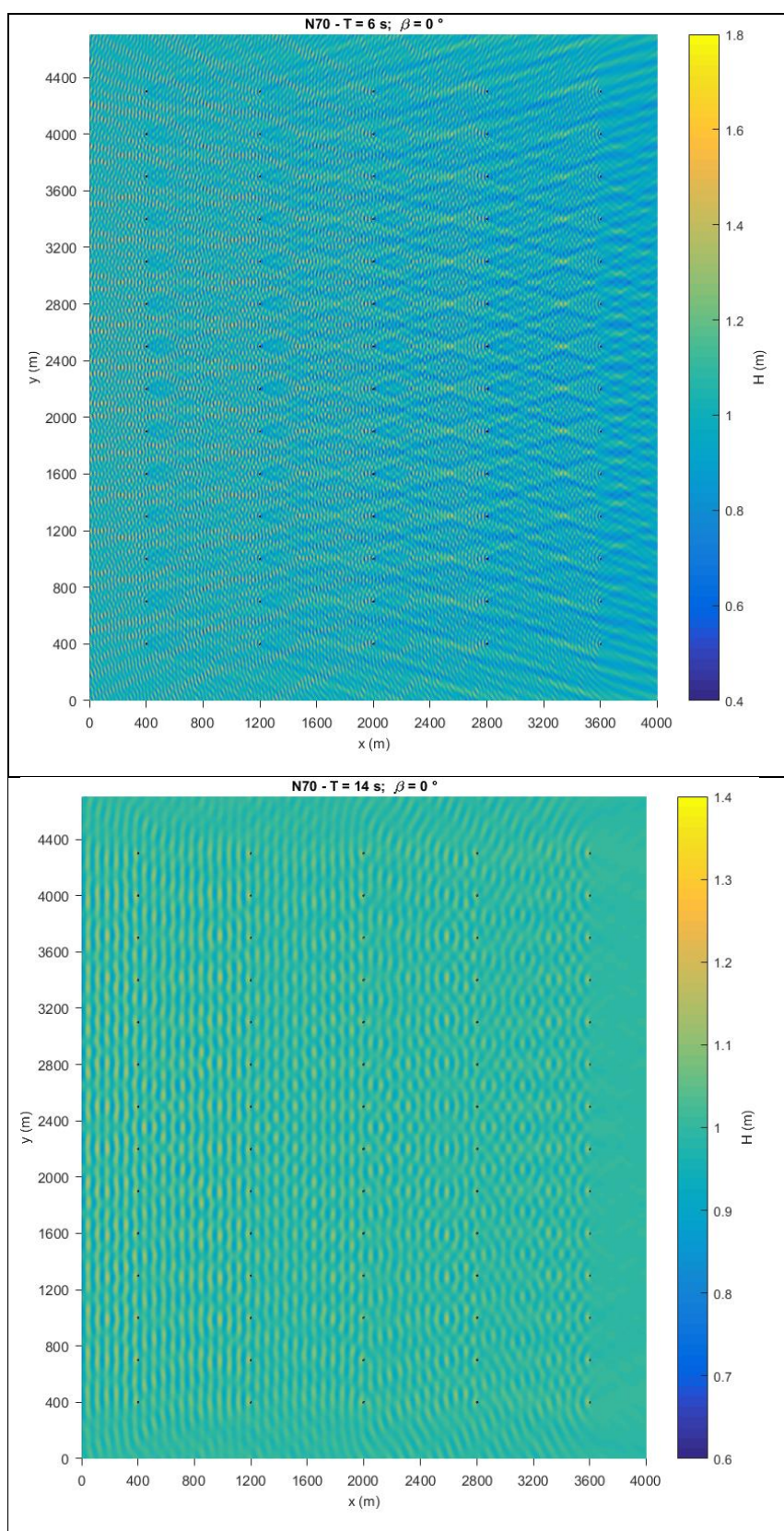


Figura 5: Variação da altura da onda no interior do parque eólico, 70 monopilares, onda com período de 6 s e de 14 s. (Fonte: Aguilera 2020)

Conclui-se, portanto, que o período das ondas é um parâmetro relevante para o dimensionamento das estruturas e das fundações, bem como para a avaliação de impactos ambientais. Ainda pouco considerados no sistema de licenciamento brasileiro destacam-se o solapamento do enrocamento de proteção a monopilares e a ressuspensão de sedimentos (CHRISTENSEN *et al.*, 2013; NIELSEN *et al.*, 2014; CHRISTENSEN *et al.* 2014). Problemas de fadiga de monopilares também são relatados na literatura, motivando a realização de estudos em modelo reduzido, onde as ondas são substituídas por acionadores de carga (e.g., KUO *et al.* 2012; SCHAFHIRT *et al.* 2016; RICHARDS *et al.* 2020). Os resultados dos modelos “unidirecionais” e “complexos” mostram-se diferentes, sugerindo a necessidade de investigações adicionais. Em geral os modelos utilizam areia seca, em diferentes graus de compactação, embora a literatura recomende a realização de ensaios com areia saturada e com outros tipos de materiais. As vibrações estão associadas às frequências e direções das ondas incidentes. No entanto, podem existir cargas cíclicas induzidas por ondas forçadas de segunda ordem em mares bicromáticos-bidirecionais (SOUZA E SILVA *et al.* 2022). Outro exemplo de cargas cíclicas são aquelas associadas ao descolamento de vórtices induzidos por correntes (por exemplo, corrente de maré, ondas de plataforma, vórtices isolados) à sombra do monopilar, gerando uma esteira hidrodinâmica. No caso das correntes de maré, há que se ter em mente que elas variam de direção ao longo das 24 horas do dia. Richards *et al.* (2020) enfatizam a necessidade de investigações mais detalhadas sobre cargas complexas, que eventualmente podem trazer consequências menos danosas para a estrutura do que cargas unidirecionais e monocromáticas.

O clima de ondas e regime atmosférico disponíveis atualmente podem auxiliar quanto a aspectos construtivos gerais. No entanto, modelos numéricos de previsão, mais robustos, com bom grau de confiabilidade dentro de uma janela de 72 horas devem ser executados, de modo a garantir a segurança do processo de implantação dos aerogeradores.

A revisão de estudos internacionais (e.g. WHITE & CASE LLP 2019) sobre licenciamento e avaliação de impactos ambientais de parques eólicos marinhos, contudo, mostra que insuficiente atenção foi dada à previsão da interação de ondas e correntes com os parques e seus efeitos distantes sobre a linha de costa.

4. CONCLUSÃO

O artigo levanta a necessidade de um detalhado estudo sobre as condições de ondas e de correntes nos locais onde for prevista a instalação de parques eólicos, além da determinação geotécnica detalhada do local onde o parque eólico vier a ser implantado, considerando que os locais propostos estão próximos a ambientes estuarinos atuais ou pretéritos.

Apresenta-se uma avaliação preliminar da altura e do período das ondas locais ao longo da costa brasileira, de modo que se possa caracterizar que, quanto maior a energia das ondas, mais robusta ou sofisticada deve ser a estrutura de suporte aos aerogeradores de um parque offshore. No entanto, observa-se que os locais selecionados na costa brasileira podem estar sujeitos a estados de mar transoceânicos, não considerados em previsões anteriores de clima de ondas na costa brasileira.

Dois aspectos são também levantados no artigo: a presença de estados de mar bicromáticos e bidirecionais e a presença (obrigatória) de correntes, que pode ser a maré astronômica, a Corrente do Brasil, vórtices associados à Corrente do Brasil ou ondas longas de plataforma. A combinação dos efeitos hidrodinâmicos com os efeitos aerodinâmicos e a própria oscilação das estruturas pode conduzir a situações que comprometam a integridade das estruturas durante a operação devido a cargas cíclicas. Quanto à própria instalação, seriam necessárias previsões meteo-oceanográficas detalhadas, em uma janela de tempo limitada.

Finalmente, conclui-se que um parque eólico influencia uma área muito maior do que a vizinhança de um aerogerador, devido à interação em bloco com o regime de ondas e de correntes, envolvendo inclusive aspectos sedimentológicos e impactos sobre a zona costeira.

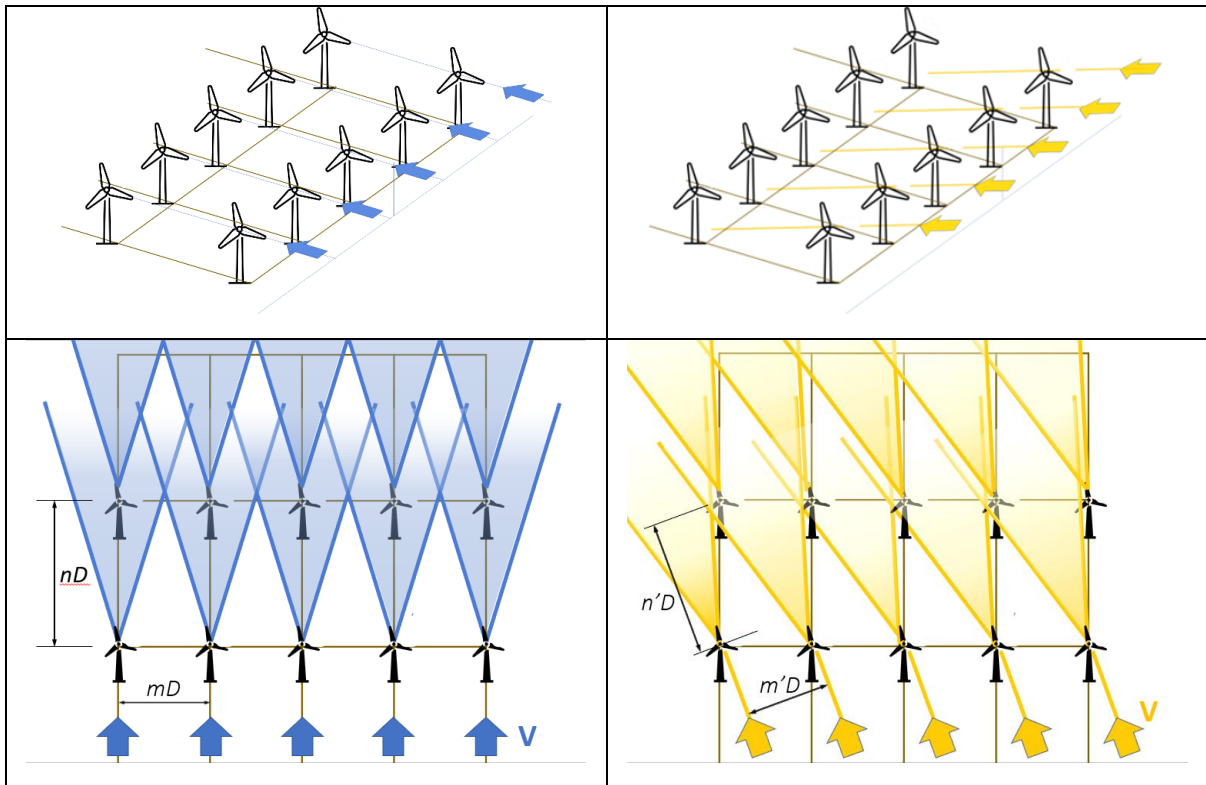


Figura 6: Influência da direção do vento na geração de energia: esteira aerodinâmica. (Fonte: Autor)

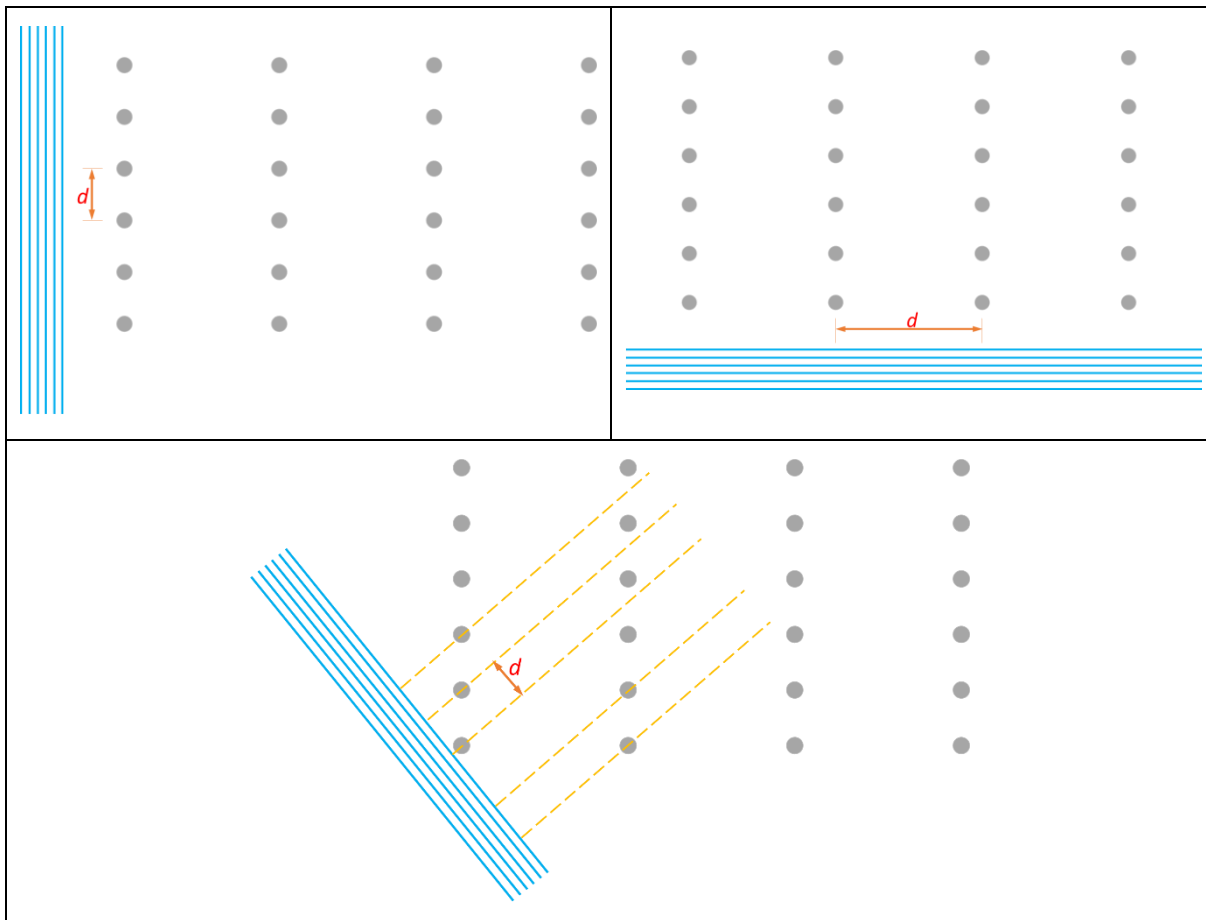


Figura 7: Incidência de onda em diferentes direções: espaçamento entre cilindros é percebido pelas ondas de modo diverso. (Fonte: Autor)



Figura 8-A: London Array visto do espaço.
(Fonte: Nasa Earth Observatory)

<https://earthobservatory.nasa.gov/images/82844/the-london-array>



Figura 8-B: Detalhe do retângulo amarelo em 2-A, indicando esteira de sedimentos causada por turbulência local em pequena escala.

Agradecimentos:

Esta investigação foi parcialmente financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Finance Code 001. Os autores agradecem também o suporte dado pelo Laboratório de Tecnologia Oceânica (LabOceano) da Universidade Federal do Rio de Janeiro para utilização do WAMIT® e pela Universidade Federal do Rio Grande no estudo sobre o clima de ondas na costa do Brasil.

REFERÊNCIAS

- AGUILERA J., L. (2020), *Interação de ondas com parques eólicos offshore de tipo monopilar*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 227 p.
- AGUILERA, J., L.; ROSMAN, P.C.C.; NEVES, C.F. (2020), "Effects of an array of widely separated vertical cylinders on time-averaged properties of progressive monochromatic waves", *Rev. Bras. Recursos Hídricos*, 25. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190140>
- AMARO, V.E. *et al.* (2015), Multitemporal analysis of coastal erosion based on multisource satellite images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil. *Marine Geodesy*, 38:1–25, doi: 10.1080/01490419.2014.904257
- BANDEIRA, J. V.; SALIM, L. H. (1999), Ten years survey (1988-1997) of morphological changes in a coastline stretch of the Brazilian Northeast, and the consequences to coastal structures and installations of the petroleum industry. *Proceedings, V International Conference on Coastal & Port Engineering in Developing Countries*, 1999, Cape Town. v. 1. p. 426-437.
- BANDEIRA, J. V.; FARIAS, E. G. G.; LORENZZETTI, J. A.; SALIM, L. H. (2013). "Resposta morfológica do Rio São Francisco, devido à retenção de sedimentos nos reservatórios", *Vetor (FURG)*, 23, p. 5-17. <https://periodicos.furg.br/vetor/article/view/3687/>
- CHRISTENSEN, E.D.; JOHSON, M.; SØRENSEN, O.R. *et al.* (2013), "Transmission of wave energy through an offshore wind turbine farm", *Coastal Engineering*, v. 82, p. 25–46. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.08.004>
- CHRISTENSEN, E.D.; KRISTENSEN, S.E.; DEIGAARD, R. (2014), "Impact of an offshore wind farm on wave conditions and shoreline development", *Proceedings, International Conference on Coastal Engineering*, v. 1, n. 34, sediment.87. <https://doi.org/10.9753/icce.v34.sediment.87>
- EVANS, J.L.; BRAUN, A. (2012). A climatology of subtropical cyclones in South Atlantic. *Journal of Climate*, 25: 7328-7340. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00212.1>
- GONZALEZ-SANTAMARIA, R.; ZOU, Q.P.; PAN, S. (2015). "Impacts of a Wave Farm on Waves, Currents and Coastal Morphology in South West England", *Estuaries and Coasts*, 38 (Suppl 1): S159–S172, <https://doi.org/10.1007/s12237-013-9634-z>
- GUIMARÃES, R.C. (2021), *Perspectivas para a exploração de energia das ondas na costa brasileira: uma análise energética, logística e geográfica*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande (FURG). <https://ppgeo.furg.br/dissertacoes-e-teses/66-publicacoes-de-2020/418-12841dissertacao-perspectivas-para-a-exploracao-da-energia-das-ondas-na-costa-brasileira-uma-analise-energetica-logistica-e-geografica-ricardo-cardoso-guimaraes>
- HASAGER, C.B.; RASMUSSEN, L.; PEÑA, A. *et al.* (2015), "Using satellite SAR to characterize the wind flow around offshore wind farms", *Energies*, v. 8, n. 6, p. 5413–5439. <https://doi.org/10.3390/en8065413>
- KUO, Y.-S.; ACHMUS, M.; ABDEL-RAHMAN, K. (2012). "Minimum Embedded Length of Cyclic Horizontally Loaded Monopiles." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138 (3): 357-363. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000602](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000602)

- McCOMBS, M.P.; MULLIGAN, R.P.; BOEGMAN, L. (2014), "Offshore wind farm impacts on surface waves and circulation in Eastern Lake Ontario", *Coastal Engineering*, v. 93, p. 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.08.001>
- MELO F^o, E.; ALVES, J. H. G. M.; JORDEN, V., ZAGO, F.; DIAS, W. S. S. (1995), "Instrumental confirmation of the arrival of North Atlantic swell to the Ceará coast". *Proceedings, 4th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries – COPPEDEC IV*, Rio de Janeiro, Brazil, p. 1984-1996.
- MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F.M.; PINHEIRO, L.S., (2020). *Geografia marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos*. 1. ed. -- Rio de Janeiro. Acessado em 4 de julho de 2023. <https://drive.google.com/file/d/1kC53ZLBkJbR1HDJc0LyTdFBgNUYH7NCZ>
- NEVES, C.F.; MUEHE, D. (1995). Potential Impacts of Sea-Level Rise on the Metropolitan Region of Recife, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 14, p. 116-131.
- NEVES, C.F.; AGUILERA, I. (2021). Contribuições de engenharia costeira ao projeto de parques eólicos offshore. *Anais. Brazil Wind Power 2021*. Acessado em 3 de julho de 2023. <https://www.brazilwindpower.com.br/content/dam/Informa/brazil-windpower/pt/2022/documentos/BWP-PAPERS-2021.pdf>
- NIELSEN, A.W.; SUMER, B.M.; PETERSEN, T.U. (2014), "Sinking of scour protections at Horns Rev 1 offshore wind farm", *Proceedings International Conference on Coastal Engineering*, v. 1, n. 34, sediment.67. <https://doi.org/10.9753/icce.v34.sediment.67>
- NOGUEIRA, I. C. M. (2014), *Caracterização do Clima de Ondas na Bacia do Espírito Santo através de Modelagem Numérica*, Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil. https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-peno_upl/THESIS/6000203/2014_mestrando_izabel_christina_martins_nogueira_20200405123439984.pdf
- PALHA, A.; MENDES, L.; FORTES, C.J.; BRITO-MELO, A.; SARMENTO, A. (2010), "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. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.025>
- PARENTE, C. E.; NOGUEIRA, I. C. M.; MARTINS, R. P. *et al.* (2015), "Climatologia de Ondas", *In: Martins, R. P., Grossmann-Matheson, G. S., editores. Meteorologia e oceanografia*, Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, v. 2. pp. 55-96.
- PAULA, D. P.; MORAIS, J.O.; FERREIRA, Ó.; DIAS, J.A. (2015), "Análise histórica das ressacas do mar no litoral de Fortaleza (Ceará, Brasil): origem, características e impactos. *In: Davis Pereira de Paula e J. Alveirinho Dias (orgs.), Ressacas do Mar /Temporais e Gestão Costeira*, p.173-201, Editora Premium, Fortaleza, CE, Brasil. ISBN: 978-85-7924-440-7
- PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. (2010). "Brazilian offshore wave climate based on WW3 reanalysis." *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(1):53-70
- RICHARDS, I.A.; BYRNE, B.W.; HOULSBY, G.T. (2020). "Monopile rotation under complex cyclic lateral loading in sand." *Géotechnique*, 70 (10): 916-930. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.302>
- RODRIGUEZ GANDARA, R.; HARRIS, J. (2012), "Nearshore wave damping due to effect of winds in response to offshore wind farms." *Proceedings, International Conference on Coastal Engineering*, v. 1, n. 33, p. 55. https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/6681/pdf_656
- RUSU, E.; GUEDES SOARES, C. (2013). "Coastal impact induced by a Pelamis wave farm operating in the Portuguese nearshore." *Renewable Energy*, 58: 34-49. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.03.001>
- SCHAFHIRT, S.; PAGE, A.; EIKSUND, G.R.; MUSKULUS, M., (2016). "Influence of soil parameters on the fatigue lifetime of offshore wind turbines with monopile support structure." *Energy Procedia*, 94: 347-356. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.194>

- SOUZA E SILVA, M.G.; KERPEN, N.; ROSMAN, P.C.C.; NEVES, C.F.; SCHLURMANN, T., (2022). "Directional infragravity waves induced by bichromatic and bidirectional waves: Theoretical approach and experimental affirmation". *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 148 (5) [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000711](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000711)
- TEIXEIRA, C.P.B.; SOUTO, M.V.S.; PINHEIRO, L.R.S.G.; MATOS, M.F.A.; GOMES, D.D.M. (2021), "Análise da evolução costeira no município de Beberibe, Estado do Ceará, entre os anos de 1979 a 2019". *Revista Geociências*, UNESP, <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i04.15874>
- VALENTINI, E.M.S. (1994), *Avaliação de Processos Litorâneos e Consequências para o Gerenciamento Costeiro no Ceará*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 80p. https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-peno_upl/THESIS/10002628/1994_doutorado_enise_maria_salgado_20220128093321653.pdf
- VANHELLEMONT, Q.; RUDDICK, K. (2014), "Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8", *Remote Sensing of Environment*, v. 145, p. 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.009>
- WHITE & CASE LLP (2019). Offshore wind projects: Assessing the environmental impact. <https://www.whitecase.com/publications/insight/offshore-wind-projects-assessing-environmental-impact> , Acessado em 8/12/2021.