

## **TIPIFICAÇÃO DE FUNDAÇÕES DE TURBINAS EÓLICAS DE PARQUES EÓLICOS OFF-SHORE**

Wallisson da Silva Nascimento (Graduando do curso de Licenciatura Plena em Geografia pela Universidade Federal do Piauí). E-mail: wallissondasilva@hotmail.com

**Resumo:** Os parques eólicos são de extrema relevância para a produção de energia limpa e sustentável. São empreendimentos industriais não somente terrestres, mas também marítimos. Estes, em comparação com aqueles, necessitam de uma maior engenharia não somente durante o processo de construção, como também nas fases de transporte de equipamentos e no processo de instalação em pleno mar. Para que este último procedimento seja realizado de forma eficaz, é relevante frisar a importância das estruturas de suporte, destinadas a estabilizar os aerogeradores no oceano. Podem ser definidas como bases de apoio e sustentação de torres eólicas marítimas. Estão submersas no mar e, de maneira geral, podem ser fixadas no leito marinho de diversas maneiras. Por conta disso, o presente artigo objetiva apresentar os resultados de uma pesquisa bibliográfica sobre os principais tipos de fundações utilizadas para implantar torres eólicas off-shore (marítimas). Busca responder à seguinte indagação: quais os principais tipos de estruturas de suporte para a instalação de aerogeradores em pleno mar? Com isso, verificou-se que os aerogeradores marítimos não são instalados através de uma única metodologia e modelo de fundação.

**Palavras-chave:** Parque Eólico, Off-shore, Fundação.

## **TYPES OF FOUNDATIONS OF WIND TURBINES OF OFF-SHORE WIND FARMS**

**Abstract:** Wind farms are of extreme importance for the production of clean and sustainable energy. They are not only terrestrial but also maritime enterprises. These, in comparison to those, require a greater engineering not only during the construction process, but also in the transportation phases of equipment and in the process of installation at sea. In order for this latter procedure to be carried out effectively, it is important to stress the importance of support structures designed to stabilize wind turbines in the ocean. They can be defined as bases for support and support of maritime wind towers. They are submerged in the sea and, in general, can be fixed in the seabed in several ways. The purpose of this article is to present the results of a bibliographical research on the main types of foundations used to deploy offshore (offshore) towers. It seeks to answer the following question: what are the main types of support structures for the installation of wind turbines in the open sea? With this, it was verified that the marine wind turbines are not installed through a single methodology and foundation model.

**Keywords:** Wind Farm, Off-shore, Foundation.

## **1. Introdução**

Com a crise petrolífera ocorrida entre as décadas de 1970 e 1980 em todo o mundo, teve início um grande interesse, por parte das nações impactadas, em buscar novas formas de obtenção de energia. Foi quando o desenvolvimento de estudos e pesquisas para o aproveitamento de fontes renováveis entrou em expansão. Atualmente, percebe-se uma verdadeira valorização dos equipamentos destinados à transformação de elementos naturais em eletricidade, caso dos parques eólicos. Em diversas nações, os investimentos públicos ou privados para a implantação de locais destinados à produção eólica, por exemplo, elevam-se gradativamente.

De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001), o vento é definido como a atmosfera em deslocamento. Origina-se na associação entre a rotação do planeta e a energia solar. Os planetas do nosso sistema solar que são cobertos por gases manifestam a existência de diferentes formas de circulação da atmosfera, apresentando, ainda, ventos sobre suas superfícies. É um mecanismo solar-planetário fixo cuja duração é calculada na escala de bilhões de anos. É considerado uma fonte de energia renovável.

Conceitua-se energia eólica a energia de movimentação inclusa nas massas de ar em deslocamento. O aproveitamento é realizado a partir da transformação da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, através de aerogeradores para a produção de energia elétrica, ou da utilização de cataventos e moinhos para atividades mecânicas, como o bombeamento d'água (ANEEL, 2005).

O parque eólico (ou central eólica) é um local, em terra firme ou em mar, no qual as turbinas eólicas estão dispostas, atuando para a produção de energia com base no aproveitamento das rajadas de vento (OLIVEIRA, 2014). Tem como finalidade a geração de energia elétrica por meio do aproveitamento da velocidade eólica (PINHO, 2008). Por conta disso, é necessário não somente um estudo rigoroso das condições eólicas, como também da topologia da área, haja vista que uma escolha inconveniente do posicionamento destas centrais pode resultar na produção de parques eólicos ineficientes e, no que tange à economia, inviáveis (OLIVEIRA, 2014).

Também define-se parque eólico como o agrupamento de aerogeradores posicionados convenientemente em um mesmo perímetro (ATLAS, 2001). Trata-se de um grupo de turbinas eólicas interligadas através de cabos de média tensão e fiações de comunicação ligados a uma

subestação e a um prédio de comando, conectados (normalmente por linha aérea) à rede elétrica nacional (PINHO, 2008).

Essa proximidade de turbinas traz como vantagem econômica a mitigação de custos: no que tange ao arrendamento, fundações, aluguel de equipamentos, trabalhadores, manutenção e estoques para reposição (ATLAS, 2001).

Nos últimos anos o uso da energia eólica para a produção de eletricidade tem evoluído progressivamente em todo o globo (TOLMASQUIM et al., 2016). Grande parte das usinas eólicas está implantada em superfície terrestre (on-shore). Entretanto diversas centrais têm sido instaladas no oceano (off-shore), por conta da redução das áreas terrestres adequadas a novas infraestruturas (principalmente no continente europeu) e devido a seu bom potencial, embora apresentem custos mais elevados (TOLMASQUIM et al., 2016).

É importante frisar que, levando-se em consideração os parques off-shore, na maioria dos casos somente os aerogeradores estão instalados no mar. Ou seja, na maioria das vezes, algumas instalações, tais como as chamadas subestações, locais de guarda dos principais equipamentos de armazenamento e controle, estão no geral posicionadas em terra, sendo interligadas aos aerogeradores a partir de cabos, igualmente aos parques on-shore (terrestres).

Em se tratando da produção desses parques, é notório o fato de as torres eólicas marítimas possuírem maior capacidade de produção de energia, em comparação com os empreendimentos on-shore. Isso pode ser comprovado a partir do fato de serem as regiões oceânicas detentoras de elevados níveis de rajadas de vento. Por esse motivo, os aerogeradores mais potentes são instalados nessas áreas.

Para que essas instalações sejam executadas de forma eficiente, é de extrema relevância os estudos e atividades técnicas executados de forma cuidadosa e bem planejada. Principalmente no que tange à escolha das estruturas de suporte que darão sustentação aos aerogeradores marítimos, pois é através delas que as torres eólicas off-shore podem permanecer estáveis em uma região que tende a provocar mobilidade aos objetos ali implantados.

Por conta disso, o presente artigo tem como finalidade apresentar os principais tipos de fundações destinadas a estabilizar os aerogeradores em pleno mar e, dessa forma, favorecer a atuação desses empreendimentos para o aproveitamento do alto índice eólico existente na região marítima.

## **2. Material e Método**

A fundação (ou estrutura de suporte) para uma torre eólica marítima é definida como uma estrutura a qual é possível projetar de variadas formas e executar de diferentes maneiras. Em seu projeto são levadas em consideração as condições específicas da área na qual será montada a turbina eólica, assim como as vantagens e, ainda, as desvantagens de cada fundação (RIBEIRO, 2015).

Segundo Silva (2014), a fundação é a construção que vai fazer a conexão entre o aerogerador e o solo. Deste modo, irá sustentar não somente as cargas estáticas (como o peso do aerogerador), como também as dinâmicas (como as rajadas e os sismos). De acordo com o autor, as fundações dos aerogeradores deverão sustentar principalmente forças horizontais aplicadas pelo vento, enquanto que em grande parte das infraestruturas em Engenharia Civil é planejada para sustentar cargas verticais.

De acordo com Ribeiro (2015), dois componentes constituem a estrutura de suporte: a subestrutura (estrutura que parte do leito até o aerogerador ou peça de transição) e a fundação (método de instalação ao fundo marinho). Levando-se em consideração a instalação em pleno mar, a fundação é uma subestrutura de maior grau de complexidade e onerosidade (RIBEIRO, 2015). Por esse motivo, é possível definir fundação como não somente a estrutura de suporte de um aerogerador, mas também a metodologia de fixação empregada.

A fundação é de extrema relevância para os chamados parques eólicos off-shore (marítimos), haja vista que ela permite o aproveitamento das fortes rajadas de vento existentes nas áreas dominadas pelo oceano. Para a utilização das correntes eólicas marítimas, é recomendada a implantação de aerogeradores de grande porte, capazes de suportar a força eólica constante e, assim, gerar mais energia elétrica. Com a instalação de uma estrutura adequada e resistente a grandes cargas, é possível que a produção de eletricidade a partir da força dos ventos seja realizada de forma eficaz e segura.

O presente trabalho é de caráter exploratório e foi realizado a partir da pesquisa bibliográfica em documentos específicos ao tema de estudo, sendo este: parques eólicos marítimos e seus principais tipos de fundações (estruturas de suporte e metodologias de fixação). A pesquisa foi dividida em quatro etapas. Primeiramente foi realizada uma seleção de trabalhos publicados sobre o tema a ser abordado. Em seguida, executou-se o estudo do assunto. Posteriormente, selecionou-se e trabalhou-se os principais conceitos e demais tipos de informações a serem apresentados. Por fim, a produção do texto final.

### **3. Referencial Teórico**

#### **3.1. Parques off-shore**

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica — ANEEL— (2005), a tecnologia contemporânea oferta uma diversidade de equipamentos, de acordo com a área de instalação ou de aplicação. Em se tratando da aplicação, os aerogeradores podem ser ligados à rede elétrica ou direcionados ao suprimento de energia elétrica de povoados ou sistemas isolados. Quanto à localização, a instalação pode ser executada em terra firme (turbinas de médio porte, por exemplo) ou off-shore (torres eólicas de grande porte) (ANEEL, 2005).

Segundo Tolmasquim et al. (2016) a produção eólica costuma ser segregada em duas categorias, segundo a localização do empreendimento: on-shore (terrestre) ou off-shore (marítimo). A implantação off-shore é predominante em países com extensão territorial pequena, que têm pouco espaço para os empreendimentos terrestres ou com rajadas potencialmente melhores no oceano.

Os autores afirmam ainda que a construção on-shore tende a ser dividida em duas subcategorias, sendo estas: a centralizada, com grandes aerogeradores agrupados, formando centrais eólicas ligadas aos sistemas elétricos regionais ou nacionais; e a distribuída, cujo fornecimento de energia é realizado diretamente às residências, empresas, fazendas e indústrias, no geral saciando a necessidade de adquirir uma porção da energia elétrica da rede. Destacam ainda que as centrais eólicas podem funcionar de modo independente, no qual as pequenas turbinas disponibilizam eletricidade em áreas não conectadas à rede, tanto por opção (para reduzir custos) ou necessidade (geralmente em locais mais distantes, nos quais a rede de distribuição de eletricidade não atende).

As instalações off-shore atuam como a nova fronteira do aproveitamento da energia eólica. Apesar de representarem instalações de elevado custo de manutenção, transporte e instalação, as construções off-shore têm aumentado a cada ano, principalmente com a redução de locais de elevado potencial eólico em terra firme. Esse esgotamento é representado pela grande acumulação de usinas eólicas nestes locais e pelas limitações ambientais exigentes sobre o uso do solo (ANEEL, 2005).

A indústria eólica tem realizado investimentos no desenvolvimento de tecnologias para a adaptação de turbinas eólicas de modelos convencionais para o aproveitamento do mar. Além desse desenvolvimento, os projetos off-shore requerem estratégias específicas quanto ao tipo

de deslocamento de equipamentos, sua instalação e funcionamento. Todo o planejamento deve ser orientado para o aproveitamento dos períodos nos quais as condições marítimas favorecem um transporte e uma instalação seguros (DUTRA et al., 2008).

Segundo Oliveira (2014), por ser caracterizado como de baixa rugosidade e fortes rajadas de vento, o oceano tem sido considerado o destino de algumas usinas eólicas. O autor destaca ainda que essas construções off-shore favorecem o que é nomeado “eficácia de potência unitária”, isto é, elevada potência com pouco cabedal de turbinas. Entretanto, devido à necessidade de conhecimentos profundos, a instalação das torres eólicas é bem mais complexa, o que pode ser exemplificado pelas fundações (OLIVEIRA, 2014).

De acordo com Ribeiro (2015), em breve as centrais eólicas marítimas poderão transformar-se numa alternativa viável à produção sustentável de eletricidade, haja vista que, além de permitirem uma mitigação da transmissão de gases poluentes capazes de contribuir para as alterações climáticas, por meio da exploração de um recurso natural até o momento infimamente aproveitado na geração de energia, permitirão ainda a elaboração de ilimitados postos trabalhistas e, simultaneamente, ajudarão no desenvolvimento de outras indústrias, como a de navegação.

Desta maneira poderão ser geradas oportunidades diversas à Engenharia Civil, seja no planejamento, na construção e no aproveitamento. Diversos desafios são apresentados a esta área do conhecimento, da qual exige-se uma resposta, sendo que alguns destes desafios são compartilhados com outras atividades, caso da instalação terrestre de usinas eólicas (RIBEIRO, 2015).

Os parques off-shore representam o novo rumo do aproveitamento da energia proveniente dos ventos. Apesar de ser uma construção de maior complexidade e custo, a quantidade dessas instalações tem-se elevado em todo o globo anualmente, principalmente devido ao esgotamento de locais de grande potencial para a produção eólica e/ou, também, aos obstáculos para a desapropriação de terra (MORELLI, 2012).

### **3.2. Nações classificadas como potências no ramo off-shore**

Muitas nações investem na implantação de empreendimentos eólicos off-shore. Destacam-se os países com poucas extensões territoriais, mas que possuem regiões litorâneas. De acordo com Oliveira (2014 apud World Windy Energy Report, 2010), as doze nações com maiores potências off-shore em 2010 foram: Reino Unido (1341 MW), Dinamarca (854 MW), Holanda

(240 MW), Bélgica (195 MW), Suécia (164 MW), China (123 MW), Alemanha (108,3 MW), Finlândia (30 MW), Irlanda (25 MW), Japão (16 MW), Espanha (10 MW) e Noruega (2,3 MW). O Brasil não se destaca na presente lista, haja vista que, possivelmente, os investimentos aplicados à produção de energia eólica são, no geral, direcionados às instalações on-shore. Segundo o Ministério de Minas e Energia — MME— (2009), a produção eólica off-shore não é considerada uma prioridade no momento. Todavia, é importante frisar seu grande potencial para esse tipo de infraestrutura, devido, principalmente, a sua grande extensão litorânea.

### **3.3. Histórico dos parques off-shore**

No ano de 1930, Hermann Honnef desenvolveu na Alemanha os conceitos primários de aerogeradores off-shore. Nos primeiros anos da década de 1970, foram propostas as instalações de usinas eólicas off-shore ao longo da costa de Massachusetts, porém nunca foram montados (OLIVEIRA FILHO, 2011 apud MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009).

De acordo com Ribeiro (2015), o início da construção dos parques eólicos marítimos para a geração industrial de eletricidade ocorreu em 1991, entretanto, só em tempos recentes é que as instalações de centrais eólicas em pleno mar têm recebido apoio.

Antes disso, no ano de 1990, foi construído na Suécia o primeiro aerogerador off-shore. Tratava-se de uma turbina com capacidade de 220 kW, posicionada a 350 m da costa, a uma profundidade de 7 m (OLIVEIRA FILHO, 2011 apud BILGILL, YASAR E SIMSEK, 2010).

A primeira usina eólica off-shore foi construída em Vindeby, na Dinamarca, em 1991. Posicionada no Mar Báltico a aproximadamente 2 km da costa, era composta por 11 turbinas eólicas, cada qual com 450 kW de capacidade. Posteriormente, em 1996, foi instalado o centro eólico Irene Vorrink, na Holanda, com 28 aerogeradores e uma capacidade de 16,8 MW (OLIVEIRA FILHO, 2011 apud NUNES, 2010).

A partir da implantação do primeiro centro eólico marítimo, ocorrida em 1991, têm aparecido variadas soluções que acompanham o desenvolvimento das usinas para locais de maiores profundidades (RIBEIRO, 2015).

Para Ribeiro (2015), durante sua primeira fase, as usinas eram instaladas em águas pouco profundas. Entretanto, nos anos posteriores as centrais eólicas foram instaladas no mar, cada vez mais profundas e distantes da planície.

### **3.4. Instalação off-shore: desafios**

O uso da energia eólica em pleno mar exige dispendiosas estruturas de suporte para aerogeradores, requer sistemas de transmissão de eletricidade submersos e tem condições de instalação, operação e manutenção de maior grau de restrição. Apesar dessas desvantagens, tais instalações apresentam a vantagem do aproveitamento de rajadas normalmente mais propícias. No que tange à velocidade média, o vento marítimo pode ser 20% superior à velocidade das rajadas em terra, e a energia gerada pelas usinas eólicas off-shore pode possuir uma superioridade de até 70% (MORELLI, 2012 apud ABB, 2012).

No que diz respeito à implantação em alto mar, Ribeiro (2015) destaca que a instalação de uma usina eólica marítima contém diversos obstáculos de natureza técnica, social, econômica e ambiental. Tais desafios exigem uma resposta e requerem a colaboração de todos os envolvidos.

A instalação de um parque eólico off-shore é uma atividade complicada e desafiante. Envolve vários intervenientes e diversos trabalhos (tais como dragagens, montagem, transporte e fixação das fundações, instalação de cabos submarinos, entre outros). Tais atividades exigem variados meios de concretização do projeto, principalmente de diferentes equipamentos especializados, os que tripulam e operam essas máquinas e as infraestruturas de suporte (RIBEIRO, 2015).

## **4. Resultados e Discussão**

### **4.1. Métodos de fixação no leito marinho**

Existem três tipos de metodologias aplicadas para a estabilização de estruturas de suporte no leito marinho. A primeira delas é o aproveitamento da gravidade. Isso significa que a fundação, para permanecer corretamente fixada na superfície oceânica, utilizará seu peso para efetuar a estabilização. Outro tipo de método é a alocação de estacas no fundo marinho. Esse procedimento é realizado a partir da perfuração do solo e, em seguida, a guarda de estacas da fundação no interior da escavação. Por fim, tem-se o método por sucção (ancoragem). Trata-se de um método caracterizado por fazer uma ligação entre uma plataforma flutuante e as ancoras cravadas no solo oceânico, impedindo desta maneira que o empreendimento se desloque por curtas ou longas distâncias.

### **4.2. Principais estudos adotados:**

Para a implantação de aerogeradores em pleno mar é exigida a aplicação de estudos objetivando uma maior compreensão da área escolhida para a existência do parque eólico e, ainda, prevenir acidentes causados por instalações efetuadas sobre uma determinada superfície incapaz de suportar esse tipo de infraestrutura.



Somente dois tipos de estudos são realizados. No estudo de âmbito meteorológico, realizam-se pesquisas destinadas ao entendimento do comportamento do mar; suas condições, intensidades e velocidades das correntes marítimas; frequência de ondas e, ainda, a posição desses e de outros eventos atuantes no oceano.

O estudo de caráter geológico tem como finalidade a compreensão do solo da área delimitada para receber a fundação. Nessa pesquisa são realizadas duas análises: uma de caráter geofísico (macrozona) e outra de concepção geotécnica (microzona). Basicamente, o estudo geofísico objetiva fazer uma pesquisa geral da superfície oceânica para, a partir disso, delimitar a área mais adequada para a instalação do parque. Em sucessão a isso, tem-se o estudo geotécnico, realizado com fins de analisar de forma mais detalhada o local definido a partir do estudo geofísico.

### **4.3. Principais tipos de fundações**

Atualmente, somente seis tipos de estrutura de suporte são existentes, sendo estas a fundação por gravidade, estaca única, tripé, treliça, sucção e a flutuante. Estas duas últimas são implantadas a partir do método de ancoragem. As demais são fixadas através da perfuração do solo marinho. Excetuando-se, entretanto, a fundação por gravidade, que se estabiliza no leito marinho por meio da atuação do peso e do tamanho de sua estrutura. A seguir, serão apresentadas suas principais características, vantagens e desvantagens.

#### **4.3.1. Fundação por Gravidade**

A chamada fundação por gravidade (Fig. 1) é uma estrutura de suporte caracterizada pela atuação do peso e tamanho do empreendimento para a estabilização no leito marinho. Trata-se de um caixão de betão vazio, feito a partir de concreto e/ou aço, para posteriormente receber determinados tipos de materiais de lastro, como a areia.

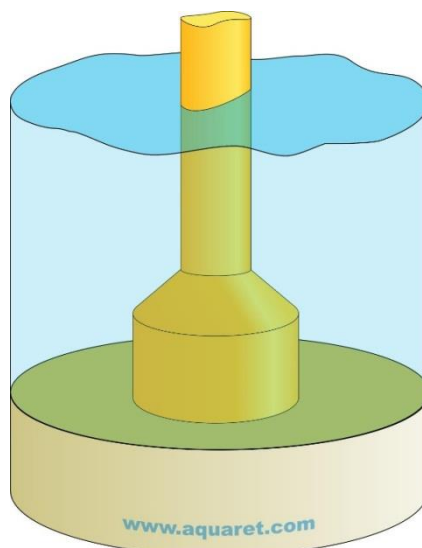


Figura 1- Esquemática da fundação por gravidade. Fonte: [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com)

No que tange ao procedimento para a instalação deste tipo de fundação, primeiramente é realizada a construção da estrutura, no geral executada em local de montagem terrestre. Em seguida ocorre o transporte, através de embarcações com alto nível de resistência e capacidade a esse tipo de carga. Posteriormente à chegada da fundação na área de instalação propriamente dita tem-se a submersão do caixão. Por fim, o compartimento até o momento vazio é enchido com material de lastro (como a areia), garantindo assim sua estabilidade na superfície marinha. A partir do final desse processo é executada a conexão do aerogerador com a estrutura de suporte.

A estrutura de suporte instalada por meio da gravidade não é indicada a grandes profundidades, o que significa a pouca extensão entre esse tipo de fundação e o continente. Segundo Ribeiro (2015), a profundidade adequada a esse tipo de fundação é de 27 metros.

Outra desvantagem são os impactos causados sobre as espécies marinhas da fauna e flora, haja vista que é necessária a realização da limpeza da área escolhida para a estabilização da fundação. Destaca-se ainda a complexidade da instalação e dos métodos para a preparação do local de alocação, não excetuando-se o maquinário destinado não somente ao transporte, como também à submersão e outros procedimentos para a fixação desse tipo de estrutura.

Em contraste, é possível destacar algumas vantagens, representadas principalmente pela fácil remoção da fundação (caso ocorra, por exemplo, algum tipo de falha durante a instalação ou funcionamento); pela resistência à deterioração e pela economia durante o processo de construção da presente fundação, em comparação com outros tipos de estruturas.

### 4.3.2. Fundação por Estaca Única

A fundação por uma única estaca (Fig. 2) é, de maneira geral, a mais utilizada entre todas as demais estruturas de suporte. De forma sucinta, é possível defini-la como um empreendimento fixado a partir do processo de cravação no solo oceânico. Trata-se de uma fundação cuja estabilidade é causada pelo atrito da estaca com as paredes da escavação da superfície marinha. O nível de profundidade para esse tipo de estrutura também é limitado. Ribeiro (2015) destaca 25 metros de profundidade.

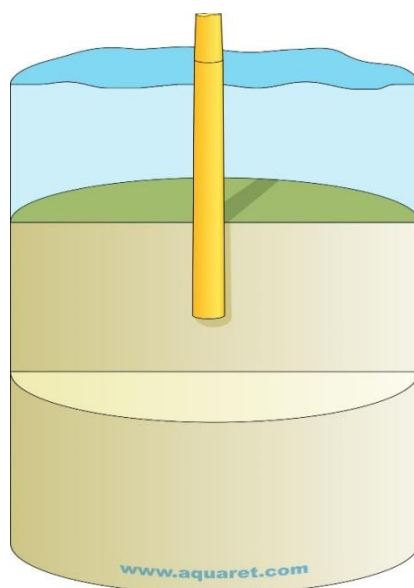


Figura 2 - Esquemática da fundação por estaca única. Fonte: [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com)

No que diz respeito aos procedimentos realizados para a fixação desse tipo de fundação, é importante frisar a perfuração e o uso de explosivos, métodos mais utilizados nessas operações. Basicamente, a perfuração é executada por meio da utilização do martelo hidráulico. Os explosivos são recomendados às escavações em superfícies predominante ou totalmente cobertas por camadas rochosas.

As principais desvantagens desse tipo de fundação são os impactos ambientais gerados, haja vista que o uso de explosivos tende a afungentar ou acidentar algumas espécies de animais marinhos que frequentam o local e, ainda, destruir porções das espécies florísticas presentes na área. No caso das perfurações, o impacto mais destacado na literatura são os ruídos causados pelas aparelhagens e pelo contato do martelo hidráulico com o leito marinho, o que incomoda principalmente a fauna do ambiente aquático. Destaca-se também a inadequação desse tipo de infraestrutura a grandes profundidades e extensões. Acrescentando-se a isso o fato de que as fundações por estaca única são indicadas apenas a aerogeradores de pequenas dimensões, o que

desfavorece seu uso na implantação de parques eólicos marítimos, no geral adequados ao uso de turbinas eólicas de grande porte para, desta forma, aproveitarem as fortes rajadas ocorrentes na região oceânica.

Entretanto, algumas vantagens podem ser frisadas. É o caso dos custos operacionais mais baixos, do transporte da estrutura de suporte e da ausência de preparação do local a receber a infraestrutura, haja vista que o procedimento tradicional é somente perfurar o solo e, em seguida, alocar a fundação.

#### 4.3.3. Fundação por Tripé

A fundação por tripé (Fig. 3) é derivada das atividades empregadas pelas indústrias petrolíferas para a construção e instalação de plataformas e outros tipos de empreendimentos em pleno mar. Ao contrário das estruturas citadas anteriormente, esse tipo de estrutura é adequado a grandes profundidades, assim como suporta aerogeradores mais robustos e potentes. No que diz respeito ao processo de fixação ao solo marinho, é relevante frisar a semelhança de sua metodologia de fixação com as atividades executadas para a alocação das fundações por estaca única no leito marinho. Assim como esse tipo de estrutura de suporte, a base por tripé não exige a prática de atividades para a preparação do solo, como as realizadas para a implantação da fundação por gravidade.

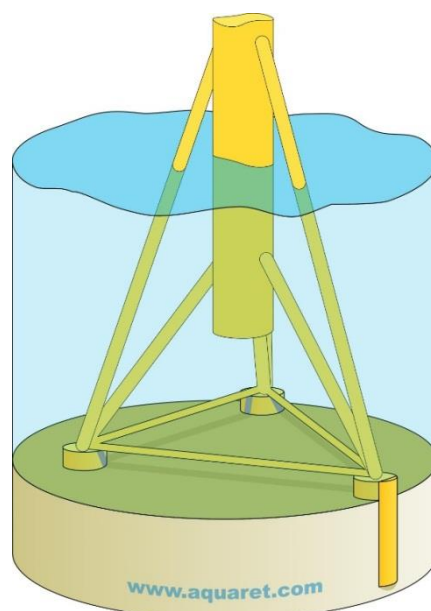


Figura 3 - Esquemática da fundação por tripé. Fonte: [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com)

No que tange aos aspectos ambientais, é possível afirmar que a fundação por tripé se destaca como causadora de impactos tanto à fauna quanto à flora marinhas. Isso pode ser afirmado a

partir do entendimento dos métodos utilizados para a cravação no solo. Igualmente à estrutura por estaca única, a fundação por tripé exige a adoção não somente de perfuração por martelo hidráulico, como também do uso de explosivos (em superfícies cobertas por rochas). Por conta das três estacas a serem fixadas, observa-se o elevado grau de impactos ambientais gerados. É sabido que tais procedimentos causam diversos tipos de impactos, podendo ser os principais a poluição sonora, destruição da vegetação aquática e a perturbação do habitat.

Uma vantagem da fundação por tripé é a sua garantia de estabilidade, pois, ao contrário da estrutura por estaca única, são três estacas fixadas ao leito marinho. Sua resistência a deterioração também pode ser destacada. Assim como a adequação a grandes profundidades, o distanciamento em relação ao continente e a capacidade para suportar o peso de aerogeradores de grande potência e dimensão.

Entretanto, os custos gerados, os impactos ambientais, o processo de fabricação e a logística (principalmente para a fixação das três estacas) acabam por desvalorizar esse tipo de empreendimento.

#### **4.3.4. Fundação por Treliça**

A chamada fundação por treliça (Fig. 4) é uma estrutura constituída por bastões de aço cruzados e ornamentados em forma de um imenso pedestal vertical. Igualmente à fundação por tripé, a estrutura por treliça é adequada a grandes profundidades, talvez a maiores metros, haja vista que essa plataforma de fixação é constituída por quatro pés/estacas, o que também a favorece na sustentação de aerogeradores de grande porte, e outros tipos de carga volumosa. O processo de fixação é semelhante ao empregado durante a alocação da fundação por estaca única, apesar de ser mais complexo, haja vista que são quatro estacas a serem instaladas no solo marinho. E por utilizar dos mesmos procedimentos de perfuração nota-se o elevado nível de impacto causado à fauna e flora marinhas (poluição sonora e destruição de habitat, principalmente), quatro vezes mais intenso.

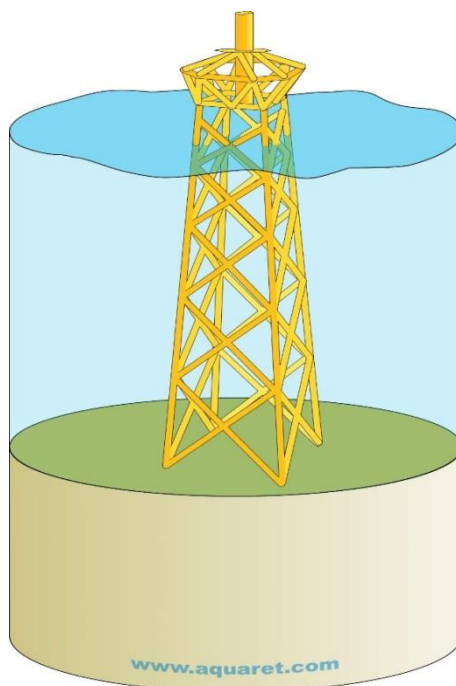


Figura 4 - Esquemática da fundação por treliça. Fonte: [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com)

Outra desvantagem que merece ser destacada é a fabricação desse tipo de empreendimento, que é bastante complexa. Em contradição a isso, nota-se algumas vantagens, representadas pela adequação a grandes distância e profundidade, sua resistência a deterioração e, ainda, a capacidade de suportar grandes cargas e volumes.

#### 4.3.5. Fundação por Sucção

A fundação por sucção (Fig. 5), assim como a estrutura por tripé, também surgiu com o desenvolvimento de plataformas petrolíferas a serem instaladas no mar. Trata-se de um empreendimento que utiliza ancoras fixadas ao solo oceânico para a estabilização de plataformas em pleno mar, impedindo assim seu deslocamento extenso para outras áreas.

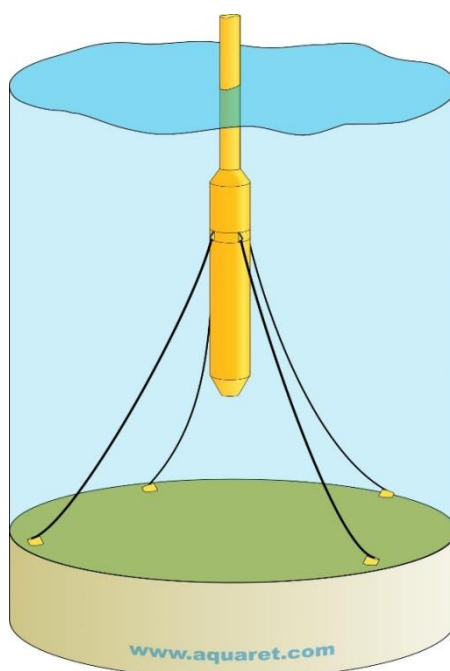


Figura 5 - Esquemática da fundação por sucção. Fonte: [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com)

Sua mais importante vantagem está ligada à rapidez durante o processo de instalação. Isso porque o trabalho mais complexo é representado pela fixação das ancoras no leito marinho. A plataforma em si não exige fixação direta, como nas fundações por treliça e por tripé, nas quais é necessária a alocação dos pés da base na superfície. Sendo somente as ancoras presas ao solo, o processo de retirada da estrutura de suporte se torna também mais rápido e de melhor execução.

No que tange às desvantagens, é relevante frisar que esse tipo de fundação não é recomendado a todos os tipos de solo. Com isso também é possível destacar outro desfavorecimento, representado pelos custos e procedimentos para as pesquisas destinadas a identificar, localizar e reconhecer os solos mais adequados para a alocação desse tipo de empreendimento.

#### **4.3.6. Fundação Flutuante**

As estruturas de suporte flutuantes (Fig. 6) são as mais recentes entre todas as fundações descritas no presente trabalho. Seu processo de instalação não difere muito do método aplicado à fixação da base por sucção, haja vista que é frequente o uso de ancoras para a estabilização da plataforma.

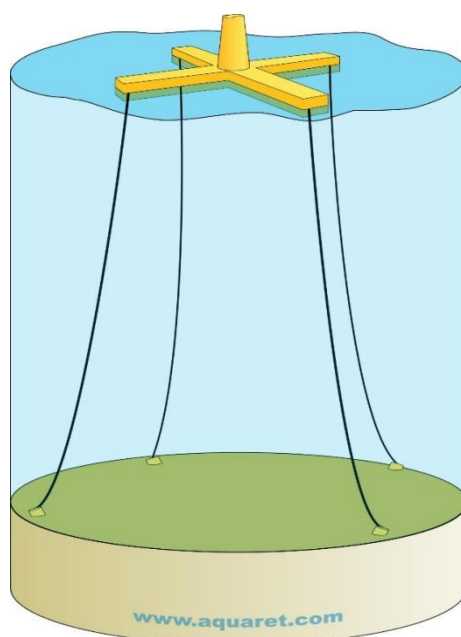


Figura 6 - Esquemática da fundação flutuante. Fonte: [www.aquaret.com](http://www.aquaret.com)

Em se tratando das vantagens existentes, é importante destacar a capacidade das fundações flutuantes em serem fixadas a grandes profundidades, podendo-se explorar zonas mais profundas do oceano. Também é possível montar as estruturas em terra, para posteriormente transportá-la ao local escolhido para a fixação. Por fim, destaca-se a rápida e fácil instalação e retirada da estrutura.

Em contraste, a necessidade de privatização de extensas áreas acaba se tornando um entrave à implantação desse tipo de fundação, haja vista que o perímetro ocupado fica impedido de ser utilizado para outras atividades, como a pesca em alto mar, o que significa o surgimento de impactos sobre as comunidades dependentes da pescaria para o melhoramento da qualidade de vida na região próxima ao local onde o parque eólico off-shore está posicionado.

## 5. Considerações finais

Como visto, o processo de implantação de parques eólicos marítimos exige técnicas, equipamentos e infraestruturas de nível superior aos empreendimentos eólicos terrestres. Destacou-se inclusive a importância das fundações para a instalação de um aerogerador em alto mar, além de seus diferentes métodos de fixação e tipos de estruturas de suporte. Abordou-se também as características desses empreendimentos, bastante diversificadas. Observou-se ainda as desvantagens dessas construções, sendo a grande maioria ligada aos impactos ambientais resultantes do processo de perfuração do solo, como a devastação da vegetação marinha e a expulsão de espécies faunísticas que habitam o leito oceânico, acrescentando-se a isso os



impactos sobre algumas comunidades (caso das fundações flutuantes). Também foi frisado as vantagens desses empreendimentos, que variam de acordo com o tipo de fundação e método de fixação. Por fim, foi abordado a diversidade dessas instalações, contrariando o senso-comum que afirma serem os aerogeradores off-shore dependentes de um único tipo de estrutura de suporte.

## **6. Referência Bibliográfica**

AMARANTE, O. A. et al. Atlas do potencial eólico brasileiro. Brasília: MME; Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2001. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf)>. Acesso em: 14 de maio de 2017.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 2.ed. Brasília, 2005.

BEZERRA, Maria Bernadete de Carvalho. **Percepção Socioambiental da Comunidade Pedra do Sal Acerca da Implantação do Complexo Eólico Delta do Parnaíba na APA Delta do Parnaíba/PI**. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2016. Disponível em:

<<http://repositorio.ufpi.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/163/DISSERTAÇÃO.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 16 maio 2017.

Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). **Uma reflexão sobre alternativas energéticas**. SILVA, Cláudio Homero Ferreira da. – Belo Horizonte: Cemig, 2016. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/A\\_Cemig\\_e\\_o\\_Futuro/inovacao/Alternativas\\_Energeticas/Documents/URAE.pdf](http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/URAE.pdf)>. Acesso em: 12 maio 2017.

Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). **Alternativas Energéticas: uma visão do Cemig**. Belo Horizonte: Cemig, 2012. 373p.

DUTRA, Ricardo et al (Org.). **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias**. Rio de Janeiro: Cresesb, 2008. 58 p. Disponível em: <[http://cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_eolica\\_2008\\_e-book.pdf](http://cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf)>. Acesso em: 14 maio 2017.

GOUVEIA, Yesmary Carolina da Silva. **Construção de um Parque Eólico Industrial**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/3566/1/Dissertação.pdf>>. Acesso em: 07 maio 2017.

GRANGEIRO, Patrício Allyson Henrique. **O Potencial de Geração de Energia Elétrica de Fonte Eólica Onshore e Offshore no Estado do Ceará: uma análise financeira, social e ambiental**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012. Disponível em: <[http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/16211/1/2012\\_dis\\_pahgrangeiro.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/16211/1/2012_dis_pahgrangeiro.pdf)>. Acesso em: 13 maio 2017.

MEDEIROS, João Paulo Costa de. **Precificação da energia eólica offshore no Brasil**. 2014. 51 f. Dissertação (Mestrado em Políticas e Gestão Públicas; Gestão Organizacional) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12228>>. Acesso em: 15 maio 2017.

MORELLI, Francis de Souza. **Panorama geral da energia eólica no Brasil**. 2012. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-04022013-101829/?&lang=br>>. Acesso em: 14 maio 2017.

OLIVEIRA, Karina Lino Miranda de. **PROJETO BÁSICO DE UM PARQUE EÓLICO E ESTUDOS DE CONEXÃO**. 2014. 114 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Piauí, Juiz de Fora, 2014. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/prh-pb214/files/2014/01/Trabalho-de-Conclusão-de-Curso-Karina-Lino-Miranda-de-Oliveira.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2017.

OLIVEIRA, Yuri Calil Loures de. **Estudo da Geração de Energia Elétrica Através do Parque Eólico do Ceará**. 2011. 50 f. Monografia (Especialização) - Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

OLIVEIRA FILHO, Oyama Douglas Queiroz de. **Uma Metodologia Simplificada para Estimativa do Aproveitamento Eólico Offshore no Litoral Brasileiro: Estudo de Caso: A Ilha de Itamaracá/PE**. 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011. Disponível em: <[http://repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/5403/arquivo6455\\_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/5403/arquivo6455_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 17 maio 2017.

PINHO, António Monteiro. **Gestão de Projectos de Parques Eólicos: Contributos para a melhoria do processo**. 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2008. Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~jmfaria/TesesOrientadas/MIEC/GestaoProjectParqEolicos.pdf>>. Acesso em: 11 maio 2017.

RAPOSO, Davide Miguel Marques. **Estudo da solução da Eólica Offshore**. 2014. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Instituto Técnico de Lisboa, Lisboa, 2014. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090412845/dissertacao.pdf>>. Acesso em: 09 maio 2017.

RIBEIRO, Cristiano Manuel Santos. **Construção de Parques Eólicos Marítimos: Processos e Direção de Obra**. 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2015.

SILVA, Manuel Duarte da. **Tipificação de fundações de torres eólicas em parques industriais, para diversos tipos de solos**. 2014. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.21/4286>>. Acesso em: 17 maio 2017.

SOARES, Luciane Teixeira. **Planejamento e Implantação de um Parque Eólico**. 2010. 76 f. Monografia (Especialização) - Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010. Disponível em:

<[http://www.dee.ufc.br/anexos/TCCs/2010.1/LUCIANE TEIXEIRA SOARES.pdf](http://www.dee.ufc.br/anexos/TCCs/2010.1/LUCIANE%20TEIXEIRA%20SOARES.pdf)>. Acesso em: 17 maio 2017.

STAUT, Fabiano. **O Processo de Implantação de parques Eólicos no Nordeste Brasileiros**. 2011. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011. Cap. 165. Disponível em: <<http://www.ppec.ufba.br/site/node/2655>>. Acesso em: 09 maio 2017.

TOLMASQUIM et al, Mauricio Tiomno (Org.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. EPE: Rio de Janeiro, 2016. 452 p. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/Documents/Energia Renovável - Online 16maio2016.pdf](http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renovavel%20-%20Online%2016maio2016.pdf)>. Acesso em: 15 maio 2017.

<http://www.aquaret.com>

<http://www.mme.gov.br>