

**TÍTULO: ANÁLISE DA ESCOLHA DOS TIPOS DE FUNDAÇÕES DE
AEROGERADORES ATRAVÉS DE SONDAGENS MISTAS**

**TITLE: ANALYSIS OF THE CHOICE OF TYPES OF WIND
GENERATOR FOUNDATIONS THROUGH MIXED SURVEYS**

Otacilio Antonio de Medeiros Junior¹

Arthur Gomes Dantas de Araújo²

RESUMO

A energia eólica, identificada como uma das fontes energéticas mais ecologicamente sustentáveis do planeta, sobressai como uma das áreas de maior promessa no campo das energias renováveis. O Brasil se destaca como um significativo produtor dessa forma de energia, a qual é caracterizada por sua fonte inesgotável e de captação acessível. Sua aplicação permeia uma diversidade de estudos, incluindo investigações do subsolo para a análise e escolha do tipo de fundação dos aerogeradores. O principal objetivo deste estudo consiste em apresentar a escolha do tipo de fundação em função do aspecto geológico/geotécnico em dois parques eólicos do país. Um na cidade de Junco do Seridó, localizado no estado da Paraíba e outro em Morro do Chapéu no estado da Bahia, são conhecidos por suas condições favoráveis de vento, o que as torna locais ideais para a expansão da energia eólica. A investigação geotécnica abordada neste estudo visa não apenas aprofundar a compreensão das características do subsolo dessas regiões, mas também a determinar os critérios técnicos que influenciarão a escolha das fundações para os aerogeradores. Os resultados da análise geotécnica em Junco do Seridó sugerem que em terrenos rochosos, a fundação direta é mais adequada, aproveitando a estabilidade natural do solo. Em solos mais frágeis como em Morro do Chapéu, a fundação em estacas é necessária para garantir a segurança das instalações dos aerogeradores. Essas soluções enfatizam a importância de adaptar as técnicas de construção de acordo com as características do solo, promovendo a eficiência e segurança em projetos de energia eólica na região.

Palavras-chave: Energia Eólica. Aerogeradores. Perfil Geotécnico. Geológico. Parque Eólico.

ABSTRACT

Wind energy, identified as one of the most ecologically sustainable energy sources on the planet, stands out as one of the areas of greatest promise in the field of renewable energy. Brazil stands out as a significant producer of this form of energy, which is characterized by its inexhaustible source and accessible collection. Its application allows for a variety of studies, including underground investigations for analysis and choice of the type of foundation for wind turbines. The main objective of this study is to present a choice of the type of foundation depending on the geological/geotechnical aspect in two wind farms in the country. A city in Junco do Seridó, located in the state of Paraíba and another in Morro do Chapéu in the state of Bahia, are known for their suitable wind conditions, which makes them ideal locations for the expansion of wind energy. The geotechnical investigation covered in this study aims not only to deepen the understanding of the subsoil characteristics of these regions, but also to determine the technical criteria that will influence the choice of foundations for the wind turbines. The results of the geotechnical analysis in Junco do Seridó suggest that in rocky terrain, the direct foundation is more appropriate, taking advantage of the natural stability of the soil. In more fragile soils such as Morro do Chapéu, a foundation at stations is necessary to guarantee the safety of wind turbine installations. These solutions emphasize the importance of adapting construction techniques according to soil characteristics, promoting efficiency and safety in wind energy projects in the region.

Keywords: Wind Energy. Wind turbines. Geotechnical Profile. Geological. Wind Farm.

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial do século XIX marcou o início da utilização de recursos naturais na geração de energia, especialmente os combustíveis fósseis. Embora o uso desses recursos remonte a pelo menos 200 anos a.C., com os moinhos de vento na Europa (DUARTE, 2021), o mundo atualmente distingue duas principais fontes de energia: as renováveis e não-renováveis. As energias renováveis, como a solar e eólica, têm recebido considerável atenção devido aos benefícios econômicos e ambientais que oferecem (KHAN; ARSALAN, 2016).

No Brasil, com seu clima favorável, particularmente no nordeste (SILVA et al., 2019), as energias renováveis, incluindo a eólica e solar, estão em ascensão. Isso contribui para uma matriz energética predominantemente renovável, com destaque para a energia hidrelétrica (EPE, 2021).

Em 1990, o Brasil alcançou um marco importante ao se tornar o pioneiro na América Latina a adotar turbinas geradoras de energia eólica. Entretanto, ao longo da década de 1990 e no início dos anos 2000, a ausência de políticas de incentivo para a implementação dessas usinas resultou em custos consideravelmente elevados para a tecnologia. Isso limitou substancialmente o crescimento desse setor durante esse período. No entanto, em 2001, um evento crucial ocorreu com a publicação do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, que estimou que o país poderia aproveitar uma capacidade de até aproximadamente 143 GW de energia eólica (SIMAS; PACCA, 2013).

Já em 2002, um marco significativo ocorreu com o início de um amplo incentivo à energia eólica. Isso foi possibilitado pela implementação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), o qual proporcionou um ambiente propício para investimentos seguros. Por meio desse programa, os investidores obtiveram a oportunidade de financiar até 80% do valor dos empreendimentos e, além disso, tiveram a possibilidade de vender a energia gerada diretamente à Eletrobras. Esse incentivo substancial impulsionou de forma significativa a utilização da energia eólica no Brasil, abrindo portas para a adoção de futuras tecnologias (SIMAS; PACCA, 2013).

Os aerogeradores, componentes essenciais das torres eólicas, incluem fundações como elementos estruturais cruciais. Estas fundações desempenham um papel fundamental ao transmitir as cargas da estrutura para o solo. Para garantir uma construção bem-sucedida e evitar danos ao solo, é essencial conhecer as características do terreno onde a estrutura será implantada. É necessário seguir rigorosamente os procedimentos executivos estabelecidos pelas normas pertinentes (MILITITSKY et al., 2015).

Localizadas no nordeste do país, a cidade de Junco do Seridó-PB e a região de Morro do Chapéu-BA são reconhecidas por sua elevada exposição aos ventos, o que torna suas áreas ideais para a instalação de aerogeradores. Nesse contexto, a escolha apropriada das fundações desempenha um papel crucial na garantia da segurança, estabilidade e eficiência dessas estruturas. Assim, este estudo tem como objetivo determinar o tipo de fundação mais adequado

com base no perfil geológico/geotécnico para os parques eólicos localizados nessas duas regiões do nordeste brasileiro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse item serão discutidos temas essenciais sobre energia eólica e fundações de aerogeradores, explorando os princípios fundamentais dessa fonte promissora de energia, juntamente com inovações nas fundações dos aerogeradores.

2.1 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica, derivada da força dos ventos, é amplamente reconhecida como uma das fontes mais ambientalmente limpas do planeta. Sua história remonta a milênios atrás, tendo seu primeiro registro documentado por volta de 2000 A.C. na China, onde cata-ventos foram inventados para alimentar sistemas de irrigação, moer grãos e bombear água. Cerca de 900 anos atrás, no século XI, durante o retorno das Cruzadas, a energia gerada por cata-ventos se disseminou pela Europa devido à sua notável eficácia. No entanto, com o advento das tecnologias da Revolução Industrial, como a máquina a vapor e as máquinas movidas a carvão, a energia dos moinhos de vento foi temporariamente relegada a um segundo plano (OLIVEIRA, 2014).

A energia eólica experimentou um renascimento significativo com o desenvolvimento de parques eólicos, que consistem em conjuntos de aerogeradores dispostos adequadamente em uma mesma área (SILVA, 2006; SOUSA, 2010). Esse avanço tecnológico tem contribuído para uma expansão substancial da capacidade de geração de energia eólica em todo o mundo, posicionando-a como uma importante fonte de energia limpa e sustentável para o futuro.

Figura 1: Segundo maior parque eólico do Brasil, localizado em Campo Largo - Bahia



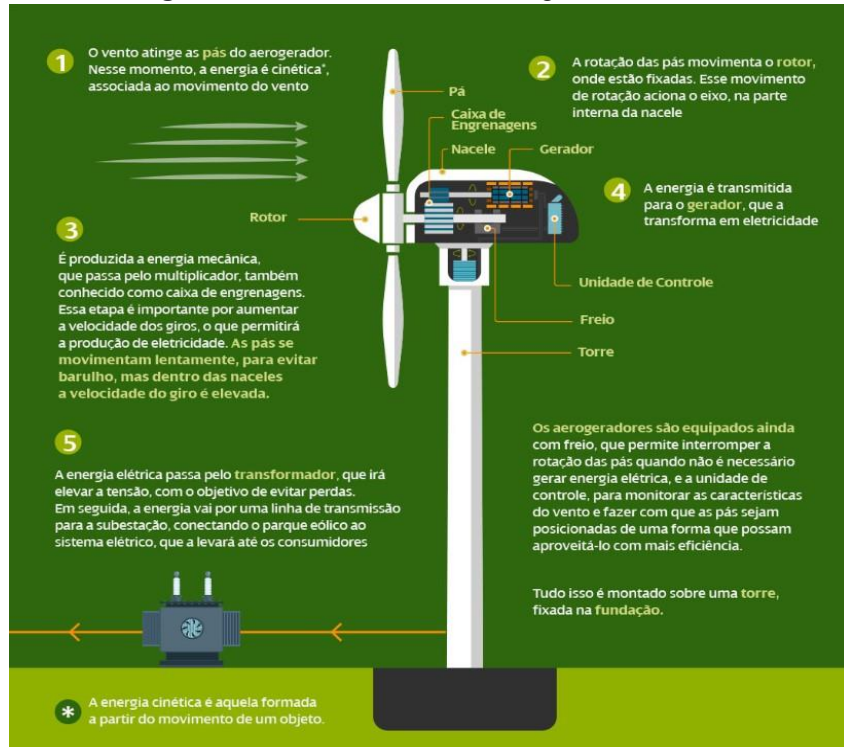
Fonte: <https://epbr.com.br/os-10-maiores-parques-eolicos-do-brasil/> (2023).

2.1.2 Aerogeradores

Os parques eólicos representam um aglomerado de turbinas eólicas que operam de forma sincronizada, apresentando uma aparência unificada quando observados do ponto de vista da rede elétrica, configurando-se assim como complexos dessa geração de energia. Esses parques podem ser categorizados em duas tipologias predominantes: "onshore", que se encontram em terra firme, e "offshore," que se localizam em águas oceânicas. No âmbito desses parques, os aerogeradores desempenham um papel de destaque, uma vez que são responsáveis por converter a energia cinética do vento em energia elétrica.

Os aerogeradores consistem em seis grupos fundamentais de componentes, a saber: pás, hub (cubo), nacela (carcaça que abriga os mecanismos internos), gerador, torre e fundação, cada qual desempenhando uma função específica no processo de captação e conversão da energia eólica em eletricidade (ALMEIDA, 2021). Na Figura 2, é mostrado o funcionamento de um gerador.

Figura 2: Funcionamento de um aerogerador.



Fonte: (Neoenergia, 2021).

2.2 FUNDAÇÕES DE AEROGERADORES

2.2.1 Fundação direta

As fundações diretas são as mais empregadas nos aerogeradores dos parques eólicos brasileiros, especialmente quando se trata de solos com maior resistência. Estas fundações, conforme definidas por Alonso (1983), são aquelas que se localizam diretamente abaixo da infraestrutura e se caracterizam por transmitir a carga ao solo através da distribuição de pressões sob sua base. É importante notar que esse tipo de fundação pode apresentar variações, dependendo das características do projeto, e podendo ser classificada como convencional ou elevada.

Figura 3: Exemplo de fundação direta



Fonte: <https://www.calterdobrasil.com.br/> (2023).

2.2.2 Fundação indireta

As fundações indiretas são frequentemente adotadas em função da qualidade do solo, especialmente quando não é possível alcançar a resistência necessária. Essa abordagem pode ser implementada de forma independente ou combinada, incluindo o uso de estacas interligadas através de um maciço de encabeçamento ou iniciando a partir do nível de escavação. Isso ocorre antes do processo de regularização com concreto para a subsequente aplicação da fundação direta (DUARTE, 2021).

Figura 4: Exemplo de fundação indireta

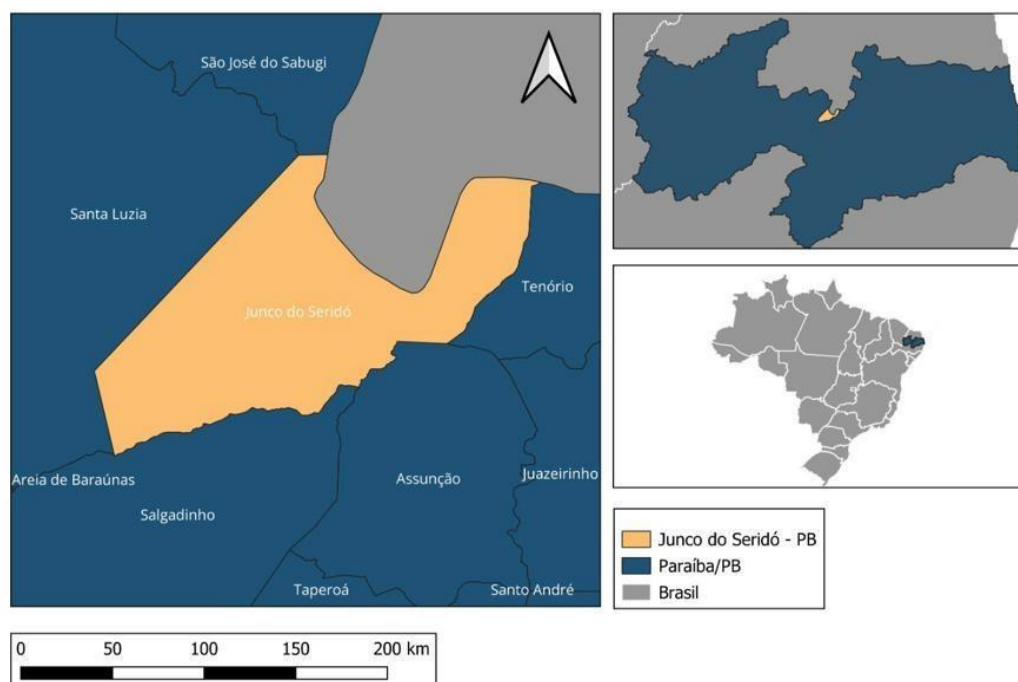


Fonte: <https://www.calterdobrasil.com.br/> (2023).

3 ÁREA DE ESTUDO

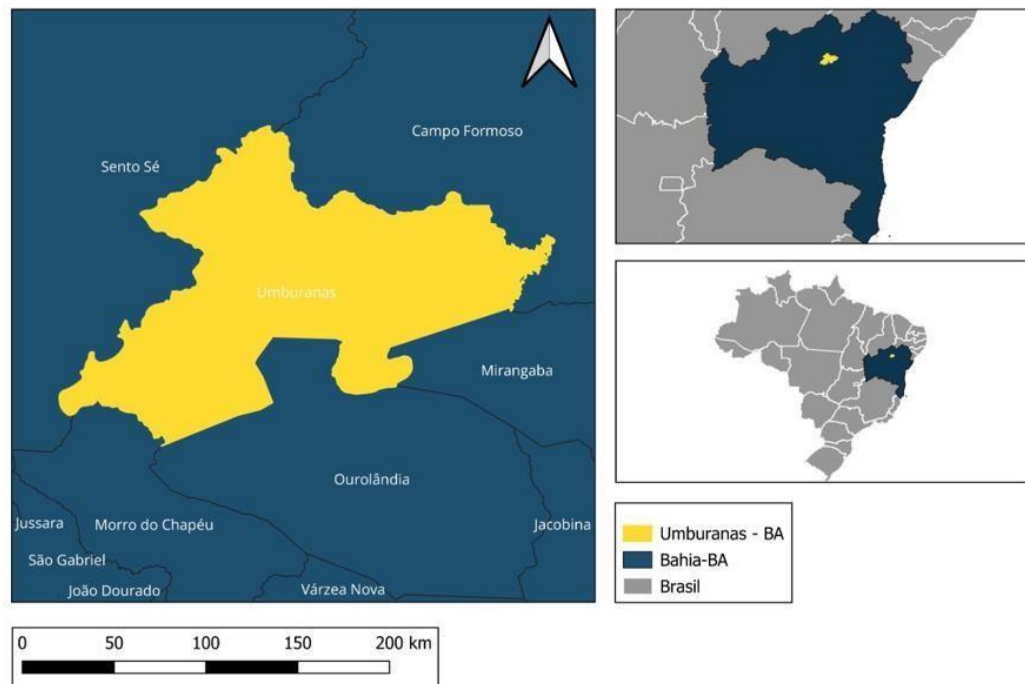
Para a realização deste estudo, a área geográfica escolhida foi o Município de Junco do Seridó, localizado na microrregião da Paraíba, nordeste do Brasil. O Município possui uma população estimada de aproximadamente 6.793 habitantes e abrange uma área territorial de cerca de 180,425 km², conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2022. No estado da Bahia, os municípios de Umburanas, Morro do Chapéu e Ourolândia foram escolhidos como locais de estudo, pois são o complexo do Parque Eólico da região. As Figuras 5 e 6 apresentam a localização geográfica destes municípios no contexto nacional. A escolha das localidades proporciona um cenário propício para uma análise sobre os aspectos estudados neste trabalho, permitindo uma compreensão associadas à energia eólica e às estruturas de aerogeradores no contexto brasileiro.

Figura 5: Localização do Município de Junco do Seridó-PB



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 6: Localização do Município de Umburanas



Fonte: Autoria própria, 2023.

Essa seleção geográfica permitiu-nos concentrar nossa análise em duas áreas de relevância estratégica para a geração de energia eólica, levando em consideração suas características geológicas, geotécnicas e econômicas específicas.

4 PERFIL GEOLÓGICO/GEOTÉCNICO

Pontos analisados como as condições na área de implantação do parque são essenciais, pois a variação em termos de resistência e profundidade podem afetar a escolha da fundação. Solos rochosos, por exemplo, podem permitir a utilização de fundações diretas, enquanto solos menos resistentes podem exigir fundações profundas.

4.1 PERFIL DE SONDAGEM EM JUNCO DO SERIDÓ-PB

A Sondagem Mista proporciona uma compreensão aprofundada das características do solo e permite uma análise detalhada das propriedades das rochas no subsolo. Essas informações detalhadas são cruciais para projetos de construção em áreas com condições

Figura 7: Representação da sondagem no parque eólico A

[illegible]

4.2 PERFIL DE SONDAGEM EM MORRO DO CHAPÉU-BA

O ensaio de Sondagem à Percussão (SPT) representa uma das práticas mais comuns de reconhecimento de solo no país. Este procedimento geotécnico de campo é essencial para capturar amostras de solo. Quando combinado com o Ensaio de Penetração Dinâmica (STP), proporciona uma avaliação abrangente da resistência do solo ao longo da profundidade perfurada. Durante uma sondagem, diversos aspectos cruciais são investigados. Primeiramente, busca-se identificar o tipo de solo atravessado por meio da retirada de amostras deformadas, coletadas a cada metro perfurado. Além disso, a resistência oferecida pelo solo à penetração do amostrador padrão é medida a cada metro perfurado. Outro fator relevante é a determinação da posição do nível ou dos níveis d'água, caso sejam encontrados durante o processo de perfuração (conforme especificado na NBR 6484/2020). Esse conjunto de informações é essencial para engenheiros geotécnicos, proporcionando dados fundamentais para projetos de construção e obras civis (FREITAS, 2021). A Figura 8 representa a sondagem apresentada no parque eólico B.

Figura 8: Representação da sondagem no parque eólico B.

Escala 1/100	Camada (m)	SPT	Qualidade da Rocha RQD (%)	DESCRIÇÃO GEOLÓGICA GEOTÉCNICA
-	0,78	2	0	argila fina cor marrom escuro com pedregulho, natureza quartzosa com vestígios de materiais vegetais.
				argila fina a média fofa, cor marrom claro, natureza quartzosa e origem residual.
-	1,80	-	29	bloco de metarenito cor cinza claro com porções avermelhadas. Apresenta cristais de quartzo cristalizados exibindo forma poligonal. Apresenta aspecto maciço sem orientação mineral. As fraturas são planas e lisas preenchidas por óxidos, JRC = 8 - 10.
			0	
-	3,30	-	0	argila média a grossa com pedregulhos, muito compacta, possui natureza quartzosa e origem residual.

	3,45		0	bloco de arenito com cor predominante cinza claro, seu arcabouço caracterizado por areia fina a média, com grãos de forma arredondada e com baixa esfericidade. A sua matriz é caracterizada por areia fina silte. Apresenta estratificação cruzada ressaltada pela presença de óxidos. Se observam bandas de conjugadas. As fraturas são planas lisas a rugosas preenchidas por óxidos, JRC = 6 - 8
	5,33		25	
-	6,23	16	0	bloco de arenito cinza claro muito alterado com trechos arenosos detachados. O seu arcabouço é composto por areia fina com grãos de quartzo arredondados e com moderada esfericidade, sendo a matriz composta por silte. Não é visível estratificação. As fraturas são planas e as podendo estar preenchidas por óxidos.
-	8,45	19	0	siltito cor cinza claro, com granulação muito fina a fina, composto principalmente por siltito e argila untuoso ao tato e poroso.
	8,83	16		
-		-	63	siltito cor cinza claro com porções avermelhadas. A rocha apresenta cristais de quartzo recristalizados e com granulação fina a muito fina sem orientação específica. Localmente se observam feições brechadas preenchidas por óxidos. A rocha apresenta fraturas concavas preenchidas por óxidos, JRC = 4 - 6.
			37	
		-	53	
			42	
-			76	
			80	
			0	
			71	
-	13,92	-	53	
-		-		

Fonte: Adaptado pelo autor (2023).

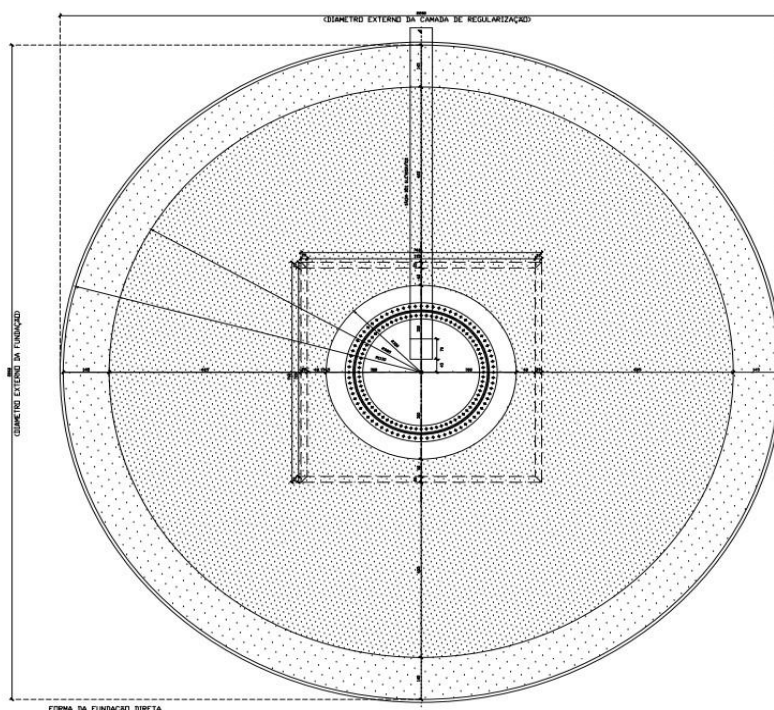
5 RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção, serão abordados os resultados do estudo, complementando-os e promovendo a discussão em torno da seleção das fundações, com especial atenção aos aspectos geotécnicos/geológicos.

No Parque A, situado na Paraíba, foi adotada a técnica de fundação direta para a avaliação do solo. A fundação direta, como o próprio nome sugere, transmite as tensões apenas pela base do elemento. Neste caso, optou-se por esta fundação devido às características geológicas e geotécnicas identificadas na região, indicando a presença de solo altamente resistente e rochoso.

O perfil adotado no parque A é um exemplo notável de fundação direta com sapatas circulares para aerogeradores. Esta escolha é baseada na distribuição uniforme de forças, independentemente da direção do vento, evitando sobrecargas nas bordas, uma preocupação comum em sapatas poligonais. Além disso, o formato circular é otimizado em relação ao consumo de concreto e aço, tornando-o uma opção economicamente viável para o projeto, como mostrado na Figura 7.

Figura 7: Projeto executivo parque eólico A



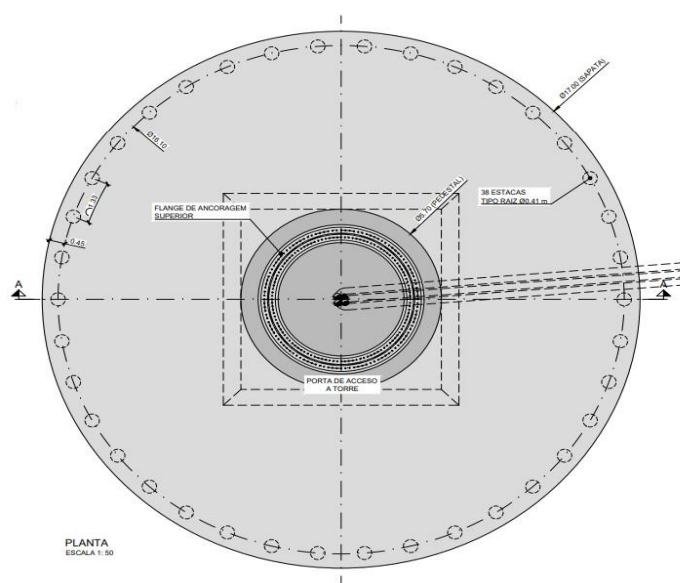
Fonte: Adaptado pelo autor, 2023.

A escolha pela fundação direta não apenas reflete uma decisão fundamentada com base nas análises geotécnicas detalhadas, mas também garante uma base robusta e estável para o aerogerador. Esta estratégia, alinhada com as condições específicas do terreno, representa uma abordagem eficaz para otimizar a eficiência e a durabilidade do sistema eólico instalado no Parque A. No item 4.1 do presente estudo, é apresentado o projeto atual em vigor do Parque Eólico A.

No Parque B, optou-se por utilizar fundações em estacas devido às características do solo, que apresenta baixa resistência. A escolha por esta técnica de fundação foi respaldada por análises detalhadas do perfil do solo. Ao enfrentar um solo menos resistente, as fundações em estacas oferecem uma solução eficaz para distribuir as cargas do aerogerador de maneira uniforme, proporcionando estabilidade e segurança.

O perfil adotado no parque B destaca o uso de estacas como opção principal em fundações profundas para turbinas eólicas onshore. Esta escolha é feita quando o solo próximo à superfície não apresenta parâmetros geotécnicos adequados em termos de resistência e deformabilidade. Esse tipo de fundação requer a execução de um bloco em concreto armado para consolidar as estacas, garantindo a estabilidade necessária para as turbinas eólicas no parque B, como mostrado na Figura 8.

Figura 8: Projeto executivo parque eólico B.



Fonte: Adaptado pelo autor, 2023.

Essa escolha estratégica ressalta a necessidade de personalizar as escolhas de fundação de acordo com as características geotécnicas específicas de cada local. Esse cuidado assegura não apenas a eficiência, mas também a confiabilidade operacional do Parque Eólico B. No projeto de cada torre, foi necessário utilizar aproximadamente 38 estacas, demonstrando a precisão e planejamento necessários para garantir a estabilidade das estruturas.

Em resumo, a escolha criteriosa das fundações para os aerogeradores dos Parques A e B destaca uma abordagem técnica especializada, ajustada às distintas características geotécnicas de cada localidade. No Parque A, caracterizado por um solo rochoso e resistente, a opção pela fundação direta proporcionou uma base sólida e segura para a operação eficaz dos aerogeradores. Já no Parque B, onde o solo apresenta baixa resistência, a implementação de fundações em estacas revelou-se uma solução inteligente para superar os desafios do terreno.

Essas decisões não apenas sublinham a importância das análises geotécnicas detalhadas na seleção das fundações, mas também enfatizam a necessidade de estratégias flexíveis e personalizadas para enfrentar as complexidades dos diferentes perfis de solo. Em última análise, essa adaptabilidade reforça não apenas a viabilidade técnica, mas também consolida a sustentabilidade econômica e ambiental dos parques eólicos. Assim, contribui de forma significativa para a contínua expansão da energia eólica, solidificando seu papel vital como fonte de energia renovável essencial para o futuro sustentável de nossa sociedade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se com o presente estudo que é evidenciada a necessidade de uma abordagem geotécnica criteriosa para a elaboração de fundações em parques eólicos. Com base nas análises realizadas, fica claro que, em solos com maior resistência, exemplificado pelo Parque Eólico A, a adoção de bases diretas, como as sapatas circulares, demonstra-se como uma alternativa eficaz e segura.

Por outro lado, em solos menos resistentes, como identificado no Parque Eólico B, a implementação de estacas surge como uma solução técnica e economicamente viável. A consideração das características geotécnicas locais não apenas garante a estabilidade estrutural, mas também otimiza os recursos financeiros, promovendo a sustentabilidade a longo prazo na indústria eólica.

É importante acompanhar como as fundações de parques eólicos se saem a longo prazo, especialmente em diferentes tipos de solo e condições reais de operação. Também seria útil explorar novos materiais que sejam mais amigos do ambiente e duráveis para essas fundações.

Criar modelos de computador melhores poderia nos ajudar a prever com mais precisão como essas fundações vão se comportar. Além disso, precisamos entender melhor os custos ao longo do tempo, não apenas o custo inicial, para tomar decisões mais inteligentes. Não podemos esquecer também de avaliar o impacto ambiental dessas fundações e encontrar maneiras de integrar parques eólicos com outras fontes de energia renovável. Tudo isso deve ser feito enquanto seguimos as normas de segurança rigorosas, que são essenciais para a longevidade da indústria eólica.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Vinicius Sousa de. Análise de viabilidade de investimento de substituição de aerogeradores: um estudo de caso. 2021.

DE FREITAS CASTILHO, Jéssica Godinho; BANDEIRA, Sandy Rebelo; PINHEIRO, Érika Cristina Nogueira Marques. Execução de sondagem pelo método SPT e rotativa estudo de caso: Obra 187-2 Allegro SPT and rotary drilling case study: Job site 187-2 Allegro. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 10, p. 100414-100427, 2021.

DUARTE, Fernanda Karoline Monteiro de Melo. **Métodos construtivos empregados em parques eólicos com fundações dos tipos convencional e Jabalcones no Rio Grande de**

Norte e Bahia. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Acesso em: 02/09/2023.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2020. 2021.

JARBAS MILITITSKY; NILO CESAR CONSOLI; SCHNAID, F. Patologia das fundações. [s.l.] Oficina de Textos, 2015.

KHAN, Jibran; ARSALAN, Mudassar H. Solar power technologies for sustainable electricity generation—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 414-425, 2016.

NBR - 6484/2020. **Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Acesso em: 27 set. 2023.

OLIVEIRA, Karina Lino Miranda. Projeto básico de um parque eólico e estudos de conexão. **Juiz de Fora**, 2014. Acesso em: 27 set. 2023.

PEREIRA, C. Tipos de fundações. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-fundacoes/>>. Acesso em: 23 set. 2023.

Relatório Técnico de Sondagens Geotécnicas. Disponível em: https://cnp.ifmt.edu.br/media/filer_public/49/7d/497d9c76-23ce-4cd5-ba50-dd60e4721284/017_sondagem_do_solo.pdf.

SILVA, Gabriel Francisco da et al. Energias alternativas: tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro. 2019.

SIMAS, M.; PACCA, S. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 77, p. 99–116, 2013.

