

# ANÁLISE DO DISTANCIAMENTO DE AEROGERADORES COM ARRANJO FÍSICO RADIAL NAS REGIÕES DE PLANEJAMENTO DO CEARÁ

**Kênio Monteles Uchôa** (UFC) - keniouchoa@gmail.com

**PAULO C. M. CARVALHO** (UFC) - carvalho@dee.ufc.br

**Camylla Narciso Melo** (UNIFOR) - camyllammelo@gmail.com

## **Resumo:**

*Para se obter uma maior eficiência em um parque eólico, a distância entre os aerogeradores e o layout (disposição) da planta possuem papéis fundamentais, uma vez que um aumento do distanciamento dos aerogeradores e sua correta disposição diminuem a perda por efeito esteira, com conseqüente ganho de produção de energia elétrica. O presente artigo coletou dados dos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) dos projetos implantados no Ceará, como dados de coordenadas das turbinas (posição) e o diâmetro do rotor da turbina a ser instalada. A partir da inclusão desses dados em software analisou-se o distanciamento entre os aerogeradores dos parques eólicos de todas as regiões de planejamento do estado que possuem esse tipo de empreendimento, a fim de se verificar a relação da distância média medida entre os aerogeradores e o diâmetro do rotor, e posterior comparação com o que a literatura, empresas de projeto e as normas nacionais e internacionais envolvidas recomendam para esse tipo de empreendimento. Os resultados mostram um distanciamento de 2,25 a 3,14 vezes o diâmetro do rotor na maior parte dos parques analisados do Ceará, estando de acordo com o que as empresas de projeto e as normas orientam, porém em alguns casos as normas não são observadas.*

**Palavras-chave:** *Distanciamento de aerogeradores, Efeito esteira, Energia eólica*

**Área temática:** *Outras fontes renováveis de energia*

**Subárea temática:** *Simulação, análise, equipamentos e sistemas de conversão eólica para eletricidade*

# ANÁLISE DO DISTANCIAMENTO DE AEROGERADORES COM ARRANJO FÍSICO RADIAL NAS REGIÕES DE PLANEJAMENTO DO CEARÁ

Kênio Monteles Uchôa – keniouchoa@gmail.com

Paulo Cesar Marques de Carvalho – carvalho@dee.ufc.br

Camylla Maria Narciso de Melo Chaves – camyllammelo@gmail.com

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Energias Alternativas

**Resumo.** Para se obter uma maior eficiência em um parque eólico, a distância entre os aerogeradores e o layout (disposição) da planta possuem papéis fundamentais, uma vez que um aumento do distanciamento dos aerogeradores e sua correta disposição diminuem a perda por efeito esteira, com consequente ganho de produção de energia elétrica. O presente artigo coletou dados dos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) dos projetos implantados no Ceará, como dados de coordenadas das turbinas (posição) e o diâmetro do rotor da turbina a ser instalada. A partir da inclusão desses dados em software analisou-se o distanciamento entre os aerogeradores dos parques eólicos de todas as regiões de planejamento do estado que possuem esse tipo de empreendimento, a fim de se verificar a relação da distância média medida entre os aerogeradores e o diâmetro do rotor, e posterior comparação com o que a literatura, empresas de projeto e as normas nacionais e internacionais envolvidas recomendam para esse tipo de empreendimento. Os resultados mostram um distanciamento de 2,25 a 3,14 vezes o diâmetro do rotor na maior parte dos parques analisados do Ceará, estando de acordo com o que as empresas de projeto e as normas orientam, porém em alguns casos as normas não são observadas.

**Palavras-chave:** Distanciamento de aerogeradores, Efeito esteira, Energia eólica

## 1. INTRODUÇÃO

A turbina eólica ao extrair parte da energia cinética do vento faz com que o fluxo que atravessa o rotor tenha sua energia cinética diminuída e consequente perda de velocidade. A essa região atrás da turbina afetada pela extração feita do rotor é chamada de esteira. Essa região é turbulenta, uma vez também que o movimento das pás faz com que haja um giro da massa de ar (Custódio, 2009). A esteira diminui à medida que se afasta da turbina que a provocou. Um parque eólico moderno tem entre 10 a 20% de suas perdas devido a efeito esteira, para perdas acima de 12% em uma aerogerador, é recomendado que esses sejam retirados e se promova uma mudança no seu *layout* (Pinto, 2013). Segundo Sá (2015), a redução na produção de energia elétrica por efeito esteira pode variar entre 2 e 20% dependendo da distância do aerogerador e da turbulência ambiente. Outras medidas podem ser usadas para se tentar evitar ou tentar reduzir essas perdas por efeito esteira, como a análise da intensidade da turbulência ambiente, direção do vento e distância dos aerogeradores.

O objetivo do presente artigo é analisar os distanciamentos dos aerogeradores de cinco parques eólicos do Ceará pertencentes a todas as regiões de planejamento do Estado, a fim de se constatar se os mesmos estão de acordo com a literatura, empresas de projeto e normas técnicas que tratam sobre o assunto.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Regiões de Planejamento

Para uma análise sistêmica de regionalizações adotadas no Estado foi proposto a criação das regiões de planejamento pautada nas semelhanças das regiões, vinculadas às características geográficas, socioeconômicas, culturais e de rede de fluxos, visando o aperfeiçoamento do planejamento, monitoramento e implementação de políticas públicas de forma regionalizada. Dados de 2019 mostram que as regiões possuem 14 territórios (IPECE, 2015).

### 2.2 Disposição das turbinas

Segundo Pinto (2013), a geometria do posicionamento das turbinas é um dos parâmetros mais importantes que afetam as perdas do conjunto. Os aerogeradores são espaçados para maximizar a quantidade de energia e sua adequação tem por objetivo de minimizar perdas por sombreamento (um aerogerador a jusante na esteira do outro a montante). O

layout geométrico do parque pode ter uma configuração de uma única linha, quadrada ou retangular. O espaçamento entre turbinas é equivalente a 3 a 10 vezes o diâmetro do rotor, devendo ser maior que 3 ou 4 vezes o diâmetro do rotor perpendicular na direção do vento preponderante e 8 a 10 diâmetros na direção paralelo a direção do vento (Letcher, 2017). Segundo Pinto (2013), é recomendado a distância de 3 a 5 vezes o diâmetro do rotor lateralmente e 5 a 7 vezes o diâmetro do rotor verticalmente. Aumentando-se essa distância, aumenta-se a eficiência de cada aerogerador em si, e conseqüentemente do parque todo. Turbinas espaçadas entre 8 a 10 vezes o diâmetro do rotor possuem perdas em torno de 10%. Os projetistas de parques eólicos recomendam um distanciamento entre 2 a 3 vezes o diâmetro do rotor na linha perpendicular à direção do vento e 4 a 5 vezes o diâmetro nas filas paralelas à sua direção (Geoconsult, 2001). A Fig. 1 apresenta o arranjo e distâncias de um parque eólico.

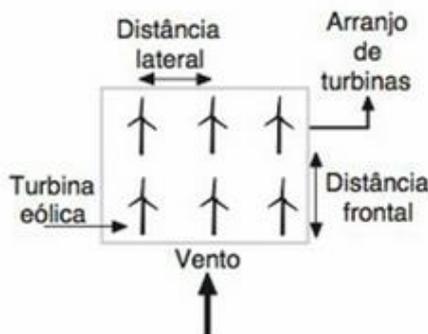


Figura 1 – Esquema básico de um parque eólico (Pinto, 2015).

### 2.3 Normas Técnicas

Segundo Winter e Segalovich (2018), a fim de se evitar falhas no desenvolvimento de um projeto eólico, as normas nacionais e internacionais colaboram com a qualidade, padrão e segurança da obra durante o planejamento da fase inicial. Os estudos a respeito do efeito esteira começaram a ser mencionados no padrão dinamarquês de projeto de turbinas eólicas DS472, onde há a menção de que o efeito esteira deveria ser considerado e que pequenas máquinas com diâmetro do rotor inferior a 25 m deveria ter uma distância de 5 vezes o diâmetro do rotor. A edição da IEC 61400-1 (*Wind energy generation systems –Part 1: Design requirements*) orientou que o efeito esteira deveria ser levado em consideração nos WTGS (*Wind Turbine Generator Systems*) em operação nos parques eólicos.

O pequeno parque de Danwin de 4 aerogeradores diferentemente espaçado situado em Alsvik na Suécia foi construído com o objetivo de evidenciar experimentalmente os efeitos do efeito esteira. Na Tab. 1 foi feito um levantamento dos distanciamentos entre os aerogeradores nos parques eólicos da época situados na Dinamarca (Frandsen, 2007).

Tabela 1 – Relação da distância medida e diâmetro do Rotor

PARQUE EÓLICO	MODELO	DM/DR
Vindeby Wind Farm	Bonus	8,57
Kappel	Vestas	3,7
Kegnæs	Bonus	2,5
Risø	Nordex	2

Fonte: Adaptado de Frandsen (2007).

Onde:

DM/DR = Relação da distância medida e diâmetro do Rotor (adimensional)

A IEC61400-1 é a principal norma internacional para projetos de aerogeradores, é a base de um conjunto de normas 61400 desenvolvido pelo Comitê 88 da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), que estabelece desde projetos até qualidade de energia. O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) exige que os parques eólicos estejam em

conformidade com a aplicação da ABNT NBR IEC 61400-21, que é tradução da IEC 61400-21. No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) adotou e traduziu as normas IEC 61400-1, 61400-12-1 e 61400-21 (EPE, 2016).

A IEC 61400-12-1 (*Power performance measurements of electricity producing wind turbines*) mostra um procedimento para medição das características de desempenho de um único aerogerador de todos os tipos e tamanhos conectados à rede elétrica. Dentre esses procedimentos, está a localização da torre meteorológica e a sua distância ao aerogerador para que se diminuam as perdas por efeito esteira. A torre não pode ficar muito próxima uma vez que o vento pode sofrer influência na frente do aerogerador e não pode ficar muito distante pois pode haver uma redução entre velocidade do vento e potência elétrica produzida. A torre meteorológica deve ficar a uma distância entre 2 a 4 vezes o diâmetro do rotor do aerogerador, sendo recomendado uma distância de 2,5 vezes o diâmetro do rotor (IEC, 2005).

## 2.4 Arranjos Físicos

De acordo com a interligação dos cabos de média tensão nos aerogeradores são formados os arranjos físicos do sistema coletor. A forma como é feito o arranjo possui relevância no custo total de construção de parques eólicos, e os estudos de otimização do *layout* da rede coletora vem ganhando abordagem nos últimos anos. Entre os arranjos mais frequentes temos o radial e ramificado (Oliveira e Penido, 2018). O arranjo mais comum em parques eólicos é o radial simples, onde os aerogeradores são enfileirados e interconectados através de um único cabo alimentador. Essa topologia está presente nos parques eólicos *offshore* de *HornsRev 1* (160 MW) e *HornsRev 2* (210 MW) localizados no mar do Norte (Oliveira, 2016). A Fig. 2 apresenta os tipos de arranjos físicos dos parques eólicos.

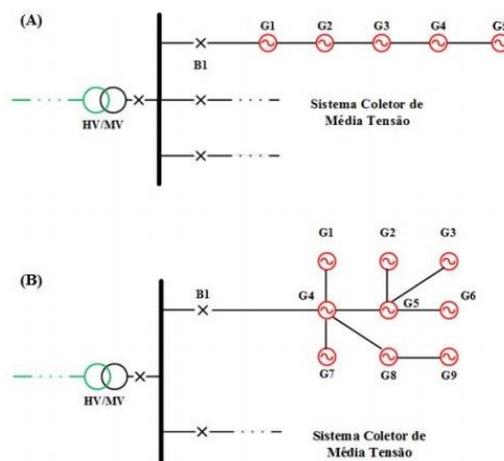


Figura 2 – Exemplos de Arranjos radial (A) e ramificado (B) (Oliveira e Penido, 2018).

## 3. METODOLOGIA

Segundo dados do Banco de Informações de Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2019 o Ceará possui 81 parques eólicos em operação, totalizando 2,05 GW de capacidade instalada (ANEEL, 2019). A Tab. 2 apresenta o número de parques eólicos em operação por município no Ceará.

Tabela 2 – Distribuição de parques eólicos no Ceará

MUNICÍPIO	Nº DE PARQUES EÓLICOS EM OPERAÇÃO
Trairi	17
Itarema	12
Aracati	11
Amontada	7
Ubajara	5
Acaraú	5
São Gonçalo do Amarante	5
Icapuí	4
Beberibe	3
Ibiapina	3
Tianguá	3
Paracuru	2
Camocim	1
Fortaleza	1
Aquiraz	1
Pindoretama	1
TOTAL	81

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2019.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) instrui que no ato do cadastramento dos empreendimentos eólicos, esses estudos dos empreendimentos deverão ser submetidos ao órgão competente no processo de licenciamento ambiental contemplando a legislação pertinente (EPE, 2011). Após um levantamento da distribuição dos parques eólicos, foi feita a busca de informações desses empreendimentos na Superintendência Estadual do Meio Ambiente (Semace), tendo como base de dados o EIA/RIMA. A primeira etapa foi a escolha de um parque eólico pertencente a um município de cada uma das cinco regiões de planejamento que possui empreendimentos eólicos. Coletou-se dados dos parques, com foco para as coordenadas geográficas dos aerogeradores e o seu diâmetro do rotor.

Em seguida, foram confirmadas as coordenadas com os respectivos parques eólicos, sendo possível pela inclusão dos dados das coordenadas no *software Google Earth*. Confirmado o parque eólico com as coordenadas coletadas, foram realizadas as medições entre os pontos das coordenadas, cada um representando um aerogerador. E por último, foram organizadas as medições, análise estatística e confrontamento das análises com a literatura e normas pertinentes.

#### 4. RESULTADOS

A partir da coleta dos dados dos EIA/RIMA e da metodologia apresentada, na Tab. 3 foi realizado um resumo dos empreendimentos eólicos escolhidos para análise.

Tabela 3 – Resumo dos empreendimentos eólicos das regiões de planejamento

REGIÃO DE PLANEJAMENTO	MUNICÍPIO	PARQUE EÓLICO	PAEG (MW)	MODELO	DR (m)
Grande Fortaleza	São Gonçalo do Amarante	CGE Taíba Águia	2,1	Suzlon S88	88
Litoral Leste	Aracati	EOL Goiabeira	2,1	WEG AGW 110-2.1	110
Litoral Norte	Acaraú	Central Eólica Coqueiros S/A	1,5	IMPISA -V77	77
Serra da Ibiapaba	Ubajara	Bons Ventos Cacimbas 3	2,1	WEG AGW 110-2.1	110
Litoral Oeste/Vale do Curu	Amontada	CGE Icaraiá II	2,1	Suzlon S88	88

Fonte: Semace, 2019.

Onde:

PAEG = Potência nominal do aerogerador

DR = Diâmetro do rotor

As imagens dos parques eólicos analisados são mostradas na Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 e Fig. 7. Os marcadores em amarelo representam os aerogeradores e as linhas vermelhas as medições dos distanciamentos.

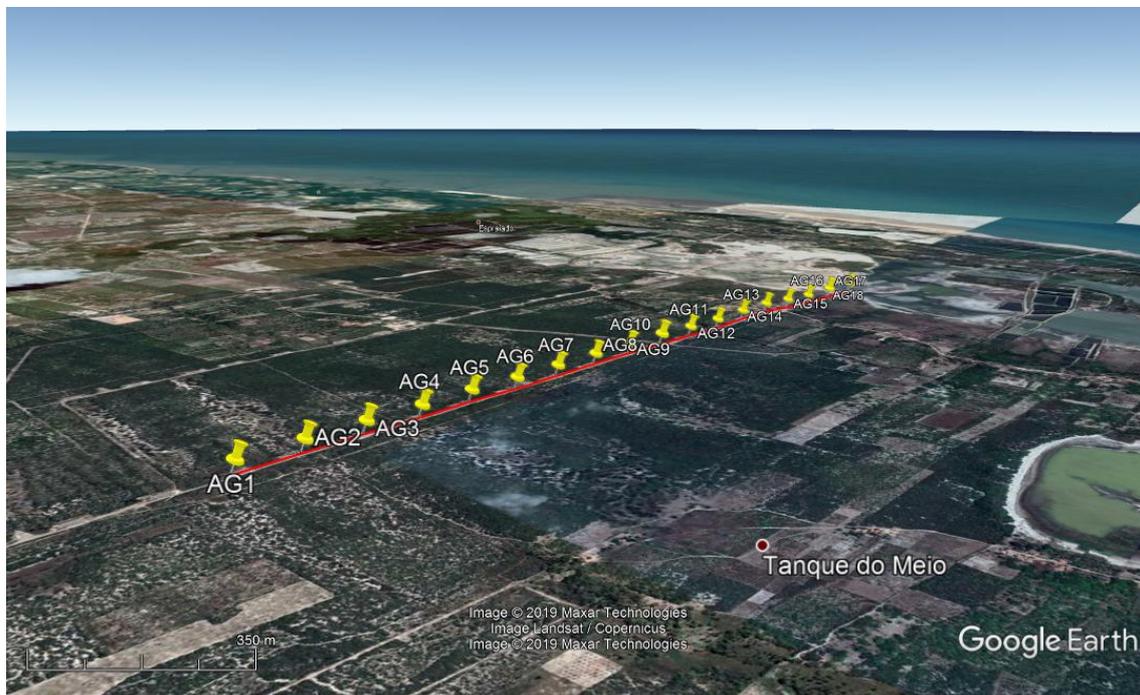


Figura 3 – Parque eólico de Coqueiros no Litoral Norte (Acaraú)



Figura 4 – Parque eólico de Cacimbas 3 na Serra da Ibiapaba (Ubajara)

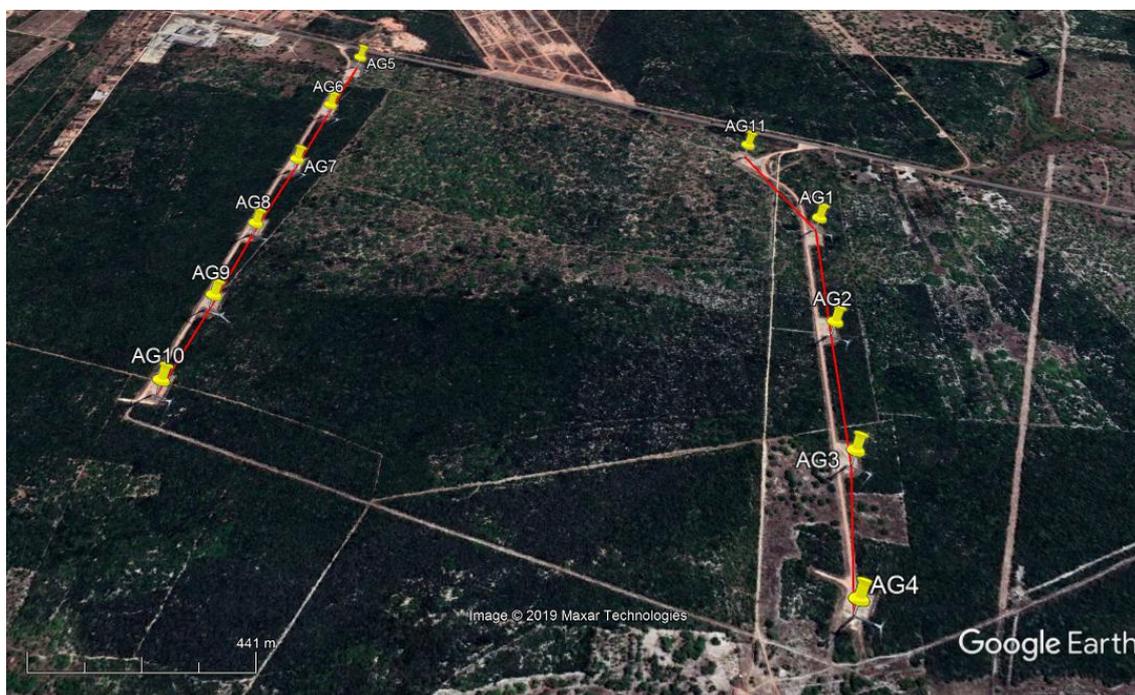


Figura 5 – Parque eólico de Goiabeiras no Litoral Leste (Aracati)



Figura 6 – Parque eólico de Icarai II no Litoral Oeste/Vale do Curu (Amontada)

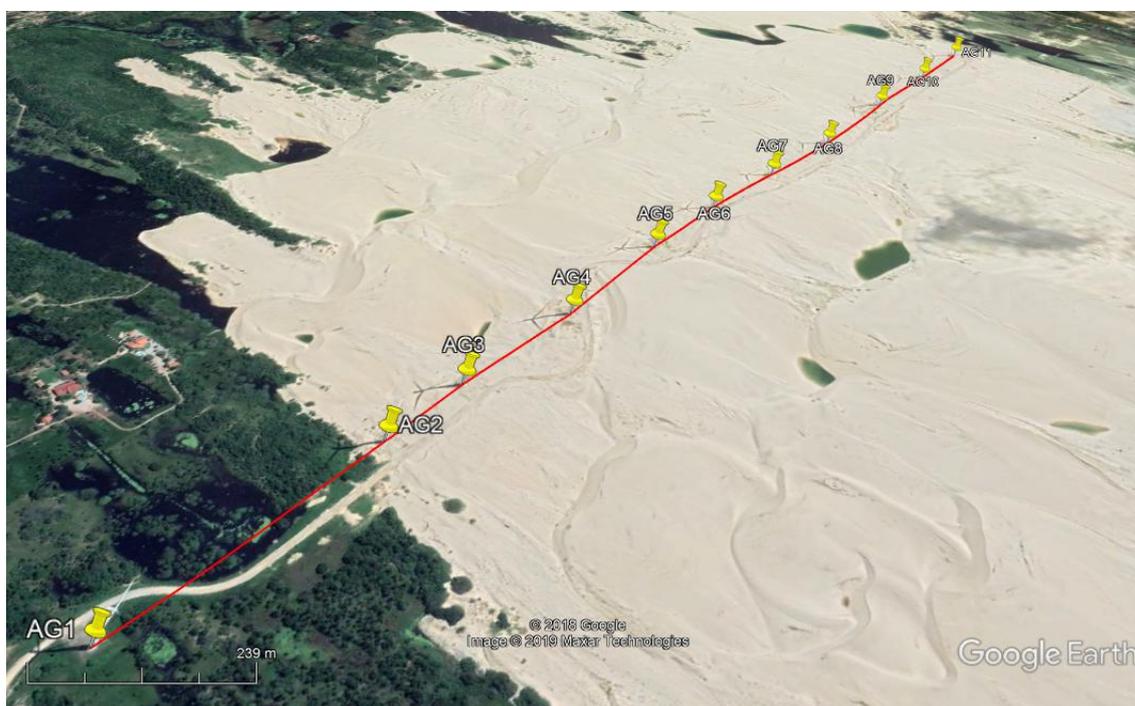


Figura 7 – Parque eólico de Taiba Agua na Grande Fortaleza (São Gonçalo do Amarante)

A Tab. 4 apresenta a série de medidas de distanciamentos de aerogeradores dos cinco parques eólicos escolhidos para análise feitas no *Google Earth*.

Tabela 4 – Medições das Distâncias entre os aerogeradores

MEDIDA DOS DISTANCIAMENTOS DOS AEROGERADORES (m)					
	Coqueiros	Icaraí II	Taíba Águia	Goiabeiras	Cacimbas3
AG1-AG2	194	202	212	389	235
AG2-AG3	192	221	227	415	247
AG3-AG4	194	219	262	415	249
AG4-AG5	192	221	222	378	246
AG5-AG6	193	300	212	301	252
AG6-AG7	192	321	185	295	254
AG7-AG8	193	157	241	308	
AG8-AG9	192	354	228	300	
AG9-AG10	194	225	149	303	
AG10-AG11	192	230	427		
AG11-AG12	193	845			
AG12-AG13	192	220			
AG13-AG14	193	222			
AG14-AG15	192	218			
AG15-AG16	193	221			
AG16-AG17	203	220			
AG17-AG18	214	163			
DM (m)	194,59	268,18	236,50	344,89	247,17

Fonte: Autor, 2019.

Onde:

DM = Média das distâncias entre os aerogeradores (em metros)

A partir das informações mostradas do diâmetro do rotor dos aerogeradores da Tab. 1 e das médias das medições dos distanciamentos dos aerogeradores da Tab. 2 foi feita a relação entre a distância entre os aerogeradores e o respectivo diâmetro do rotor. A Tab. 5 apresenta um resumo das distâncias, diâmetro do rotor e sua relação nos parques eólicos escolhidos para análise.

Tabela 5 – Relação da distância medida e diâmetro do Rotor

PARQUE EÓLICO	DM (m)	DR (m)	DM/DR
Goiabeiras	344,89	110	3,14
Icaraí II	268,18	88	3,05
Taíba Águia	236,50	88	2,69
Coqueiros	194,59	77	2,53
Cacimbas 3	247,17	110	2,25

Fonte: Autor, 2019.

Onde:

DM = Média das distâncias entre os aerogeradores (em metros)

DR = Diâmetro do Rotor (em metros)

DM/DR = Relação da distância medida e diâmetro do Rotor (adimensional)

A partir do exposto, Tab. 6 apresenta um resumo do que a literatura, empresas de projeto e a normas estipulam para o distanciamento mínimo dos aerogeradores.

Tabela 6 – Orientações quanto ao distanciamento

	FONTE	DISTANCIAMENTO (m)
Literatura	Letcher	3D
	Pinto	3D
Empresas de Projeto	Geoconsult	2D
Normas Internacionais	DS472*	5D
	IEC 61400-12	2D
Norma Nacional	ABNT NBR IEC 61400-12	2D

\*Orientação para turbinas com rotor inferior a 25 metros

## 5. CONCLUSÃO

O presente artigo apresenta uma análise dos distanciamentos dos aerogeradores do Ceará a partir da análise e coleta de dados de parques eólicos em operação no Estado. O presente estudo demonstra que o distanciamento dos aerogeradores no Estado está seguindo na maioria dos casos o distanciamento mínimo do que as empresas de projeto e as normas nacionais e internacionais recomendam, uma vez que a média geral das distâncias medidas são superiores a 2 vezes o diâmetro (2D), Goiabeiras (3,14D), Icará II (3,05D), Taíba Águia (2,69D), Coqueiros (2,53D), Cacimbas 3 (2,25D). Porém, alguns distanciamentos são inferiores ao que a literatura orienta nos casos dos parques de Taíba Águia, Coqueiros e Cacimbas 3, pois seus distanciamentos são inferiores a 3 vezes o diâmetro (3D), indicando que os parques sofrem possíveis perdas por efeito esteira, sendo necessário uma discussão futura sobre um eventual impacto na produção de energia elétrica dos mesmos. Também é observado que as medidas dos distanciamentos possuem grandes variações, como é observado no parque de Icará II, onde houve medições de 9,6D (AG11-AG12) e 1,78D (AG7-AG8) no mesmo parque eólico, devido a possíveis fatores ambientais, indicando que para esse tipo de parque eólico as perdas por efeito esteira deverão ser analisadas em trabalhos futuros, pois o valor DM/DR ignora esse tipo de particularidade. Ao se comparar os dados do Ceará com o dos parques já implantados no mundo, é observado que os parques do Estado estão na maioria dos casos dentro das faixas de distâncias dos instalados no exterior e até em valores superiores de distanciamento.

### Agradecimentos

Paulo C. M. Carvalho agradece ao CNPq pela bolsa de pesquisador concedida.

Kênio M. Uchôa agradece à Deus pela saúde e família, aos pais pela criação e a sua irmã Keula, sua maior fonte de amor em vida.

### REFERÊNCIAS

- Commission Electrotechnique Internationale. IEC 61400-12-1. [s.l.: s.n.].
- Custódio, Ronaldo dos Santos. Energia Eólica: Para Produção de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009. 280 p.
- De Oliveira, K. L. M.; Penido, D. R. R.; de Araújo, L. R. Planning of the Wind Farm Distribution Network using Heuristic Methods. IEEE Latin America Transactions, v. 16, n. 12, p. 2917–2924, 2018.
- Elétrica, A. N. DE E. BIG - Banco de Informações de Geração. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/CapacidadeEstado.cfm>>. Acesso em: 4 nov. 2019.
- Empresa de Pesquisa Energética. Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à participação nos Leilões de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: [s.n.].
- Frandsen, S. T. Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine clusters. [s.l.] Technical University of Denmark, 2007.
- Geoconsult. CGE Taíba Águia: Estudo de Impacto Ambiental - EIA, Relatório de Impacto Ambiental - RIMA. Fortaleza: [s.n.].
- Letcher, T. M. Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. [s.l.] Joe Hayton, 2017.
- Mauricio Tiomno Tolmasquim. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Rio de Janeiro: [s.n.].
- Medeiros, C. N. de et al. As Regiões de Planejamento do Estado do Ceará. Fortaleza: [s.n.].
- Oliveira, K. L. M. de. Otimização da Rede Coletora de Média Tensão de Parques Eólicos Utilizando um Algoritmo

Genético Modificado, Juiz de Fora, 2016.

Pinto, M. de O. Fundamentos de Energia Eólica. Rio de Janeiro: [s.n.].

Sá, F. I. P. de. Efeito da esteira de aerogeradores sobre a produção do parque eólico de Beberibe, Florianópolis, 2015.

Winter, A. C.; Segalovich, R. N. Análise das condições de segurança em usinas eólicas, Curitiba, 2018.

## **DISTANCING ANALYSIS OF AEROGENERATORS WITH RADIAL PHYSICAL ARRANGEMENT IN THE PLANNING REGIONS OF CEARÁ**

**Abstract.** *To obtain greater efficiency in a wind farm, at a distance between wind turbines and the layout (layout) of plant resources, since an increase in the distance between the wind turbines and their correct selection will decrease the loss due to the technique, with consequent gain of electric energy production. This article collected data from Environmental Impact Studies (EIA) and Environmental Impact Reports (RIMA) from projects implemented in Ceará, as well as coordinate data of the turbine rotor position and diameter to be used. From the inclusion of this data in the software analyzed or distanced between the wind turbines in parks and all regions such as the state planning regions that have this type of enterprise, in order to verify the relationship between the average distance measured between the wind turbines and the size rotor, and subsequent comparison with the literature, design companies and as national standards and international recommended for this type of enterprise. The results show a distance of 2.25 to 3.14 times the diameter of the rotor in most of the analyzed parks in Ceará, the configurations according to what the design companies and the norms guide, but in some cases the norms that are not observed.*

**Key words:** *Wind turbine distance, Wake effect, Wind energy*