

Monografia de Graduação

Modelagem da propagação de ruídos em parques eólicos

Gladson Fonthainny Pinheiro da Silva

Natal, Agosto de 2023

Agradecimentos

Primeiramente, quero agradecer a Deus por toda a graça e consolo transmitidos a mim ao longo do desenvolvimento deste trabalho e, sobre esse respeito, citar as palavras de Paula de Tarso “Sou grato para com aquele que me fortaleceu, Cristo Jesus, nosso Senhor, que me fortaleceu e me considerou fiel, designando-me para o ministério” (I Tm 1:12).

Quero agradecer aos meus pais por toda o entusiasmo e incentivo dado nas horas mais necessárias.

Não posso deixar de agradecer à minha noiva Aline Coelho, uma pessoa determinante para o exito neste processo, pelos seus conselhos e sua disponibilidade capazes de me impulsionar sempre que achei que as coisas não iam bem.

Deixo minhas palavras de agradecimento também à Raniere Rodrigues, sem o qual eu nunca teria desenvolvido no campo da programação em *Python*. Seu companheirismo e exemplo, sobretudo, no início das pesquisas no ISI – ER permanecem na minha memória.

Por fim, quero agradecer aos professores doutores Osvaldo Chiavone Filho e Afonso Avelino Dantas Neto, por todas as oportunidades, por toda presteza e por ter tido o privilégio de os ter conhecido não somente como os grandes pesquisadores que são, mas também como pessoas incríveis.

Da Silva, G. F. P. **Modelagem da propagação de ruídos em parques eólicos**. 2023. yy33 p.
Graduação. PRH-44 - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Adilson José de Oliveira

Coorientador: Me. Antônio Marcos de Medeiros

Resumo

A energia eólica tem, no Brasil, uma participação muito alta em sua matriz energética, estando entre as três maiores fontes do país, e está numa crescente. A perspectiva é que num futuro próximo, em 2022, tenha 20 GW em capacidade instalada em todo território brasileiro. Atualmente a maior parte da capacidade instalada se concentra na região nordeste, a qual é responsável por 85% da produção dessa forma de energia. Uma questão a ser levada em conta é o efeito da propagação sonora dos parques eólicos e os impactos que isso pode causar sobre a saúde da população e da vida animal em volta do parque. Atualmente as simulações de propagação de ruído são realizadas por softwares como o SPreAD-GIS e o INoise , de alto custo de aquisição. A pesquisa tem como objetivo a criação de um script na linguagem Python, com interface no software QGIS, que é um software open source, gerando assim uma alternativa gratuita, especifica para simulações em parques eólicos, que, por fim poderá servir como instrumento em novos trabalhos acadêmicos, pesquisa e desenvolvimento. A pesquisa tem o suporte do laboratório de energia eólica do SENAI CTGÁS - ER.

Palavras-chave: Energia eólica, Propagação de ruído, QGIS, Open Source

Abstract

Wind energy has, in Brazil, a very high participation in its energy matrix, being among the three largest sources in the country, and it is growing. The perspective is that in the near future, in 2022, it will have 20 GW in installed capacity throughout Brazil. Currently, most of the installed capacity is concentrated in the northeast region, which is responsible for 85% of the production of this form of energy. One issue to consider is the effect of sound propagation from wind farms and the impacts this can have on the health of the population and animal life around the park. Currently, noise propagation simulations are performed by software such as SPreAD-GIS and INoise, which have a high acquisition cost. The research aims to create a script in Python language, with an interface in the QGIS software, which is an open source software, thus generating a free alternative, specific for simulations in wind farms, which, finally, can serve as an instrument in new academic work, research and development. The research is supported by the wind energy laboratory of SENAI CTGÁS - ER.

Keyword: Wind energy, Noise propagation, QGIS, Open Source

Sumário

1. Introdução.....	6
2. Revisão bibliográfica	8
3. Metodologia	23
4. Resultados e Discussão	26
5. Referências	32

1. Introdução

A energia eólica é apontada como um dos principais expoentes dentre as energias renováveis no Brasil, podendo aumentar ainda mais a sua contribuição em breve. Segundo dados disponíveis no site da ANEEL (2022), em 2022, no Brasil, já são 1164 usinas instaladas no país, e uma capacidade instalada de 21 GW, contribuindo com 11,61% do fornecimento da matriz energética nacional, o que a torna a segunda maior fonte de energia do país, apenas atrás da energia hidroelétrica. O que chama a atenção é que a geração de todas as fontes do sistema integrado nacional cresceu 1,5%, enquanto que a energia eólica, no mesmo período, cresceu 15,5%, as previsões apontam uma capacidade instalada de 24 GW para 2024 (BOLETIM ANUAL DE GERAÇÃO EÓLICA, 2019), devido a leilões espalhados pelas regiões do país.

É importante considerar as características de cada região, características tais como velocidade dos ventos, direção dos ventos, umidade relativa, rugosidade e outras características da cobertura do solo, pois todas essas peculiaridades do espaço em questão passam, em um processo de implementação de um parque eólico, por intervenções que causam impactos na natureza, podendo, em alguns casos, afetar até a saúde humana e da vida animal nas proximidades dos parques.

Nos parques eólicos, durante a ação dos ventos, o movimento das pás eólicas ocorre. O sistema é complexo, e é apresentado no decorrer do trabalho. As interações que ocorrem entre os elementos mecânicos geram, então, ruídos que podem ser divididos em dois grupos. É possível identificar as fontes de emissão sonora de um aerogerador como a caixa de máquinas, na nacelle e o perfil da pá do aerogerador, no entanto, no presente trabalho, a análise é feita do ponto de vista espacial, sendo assim, é totalmente cabível não olhar apenas para um componente específico do aerogerador, mas considerar todos os componentes envolvidos na emissão de ruído.

Atualmente, no processo de implementação dos parques eólicos, uma análise é realizada para avaliar tais propagações de ruído. O Software ArcMap® surge como o estado da arte neste tipo de simulação, pois o mesmo é compatível com o pacote (caixa de ferramentas) Sound mapping tools que contem alguns modelos de análise de propagação de ruído. O modelo escolhido como referência para este trabalho é o SPreAD-GIS, pois o mesmo é capaz de realizar uma simulação de propagação de ruído levando em conta os efeitos do espalhamento esférico, absorção atmosférica, influência da direção dos ventos, interações com o solo e a influência das barreiras físicas.

A utilização dessa caixa de ferramentas está disponível de forma gratuita, porém, todo o desenvolvimento da ferramenta é voltado as especificações da Application Programming Interface (API) do ArcMap®, que é um software de elevado custo de aquisição. Com isso, surge espaço no mercado para outras alternativas de simulação.

O presente trabalho parte da hipótese de criar uma nova alternativa para atender a indústria eólica, tendo por objetivo gerar um código capaz de aplicar, com o uso de tecnologia SIG (Sistemas de Informação Geográfica), os modelos descritos nas normas ISO 9613-1 e 9613-2, tendo o SPreAD-GIS como referência. Esses modelos são implementados via linguagem de código, usando Python que é compatível a API do QGIS. A finalidade disso é entregar resultados de alta qualidade, porém, tendo dois atrativos a mais, que são: viabilidade econômica e o fato do novo código ser direcionado, especificamente, para simulações em parques eólicos.

A pesquisa tem o dever de contribuir com a indústria energética, atendendo a indústria eólica, especificamente, e contribuindo para uma implementação cada vez mais responsável dos parques, possibilitando isso em empreendimentos instalados em qualquer região, levando em conta as suas peculiaridades. Para chegar a tal resultado, a pesquisa deve atender a objetivos específicos.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- A. Caracterização da fonte sonora
- B. Desenvolver script com uso de linguagem computacional em Python para simular a propagação ruído em um ambiente de geoprocessamento
- C. Modelar os padrões de propagação de ruídos em parques eólicos considerando:
 - Equacionamento baseados em aspectos normativos;
 - Identificar os níveis excedentes em relação aos ruídos de fundo do próprio ambiente, buscando-se o reconhecimento de áreas com potencial para ocorrência de impactos ambientais;
- D. Simular a propagação de ruído

Objetivo secundário:

Comparação de resultados com o Spread-GIS e/ou outros softwares comerciais.

2. Revisão Bibliográfica

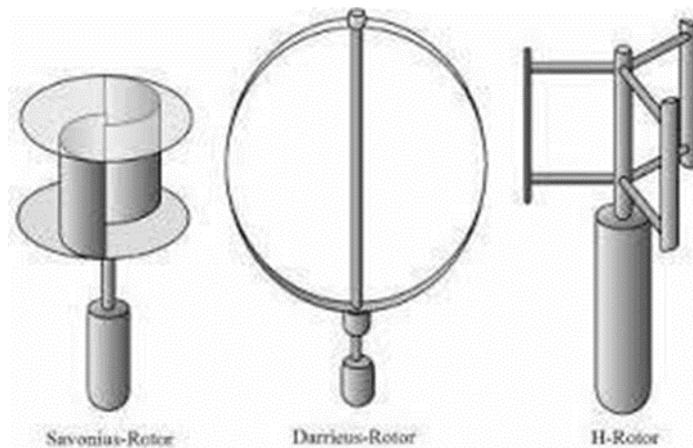
A presente revisão bibliográfica está dividida nos seguintes tópicos: Princípio de funcionamento de aerogeradores de eixo horizontal, materiais tipicamente empregados nas pás eólicas, geração de ruídos, geração de ruídos em parques eólicos, impacto ambiental, tecnologia SIG e uma abordagem sobre a linguagem Python. O primeiro tem por objetivo mostrar os diferentes tipos de aerogeradores, destacando o aerogerador de eixo horizontal e, por fim, explicar seu funcionamento desde extrair energia cinética do fluxo de ventos até seu resultado final, a conversão dessa energia em energia elétrica. O segundo tópico trata dos materiais utilizados em uma pá eólica. O terceiro tópico aborda fundamentos sobre o ruído, desde sua classificação e grandezas físicas, em seguida o quarto tópico contextualiza o conceito de ruído, gerado pelos aerogeradores, depois, no sexto tópico o enfoque é abordar nos impactos que a emissão de ruídos nos parques eólicos pode causar. Por fim, o quinto e o sexto tópico tratam, respectivamente da tecnologia SIG e da linguagem Python, justificando a escolha das mesmas para a pesquisa.

2.1 Princípio de funcionamento de aerogeradores de eixo horizontal

Atualmente a geração de energia por meio dos ventos é uma alternativa que vem sendo bastante explorada, devido a suas benesses ambientais como o fato de ser uma forma de energia renovável com baixa emissão de gases poluentes e geração resíduos, além de contribuir com uma menor emissão de gases do efeito estufa. A essa forma de energia é dado o nome de Energia Eólica. Para que a energia cinética do fluxo de vento seja convertida, por fim, em energia elétrica disponível na rede de abastecimento, é necessária a atuação dos aerogeradores. Os aerogeradores são os dispositivos responsáveis por absorver uma parte da energia cinética dos ventos e realizar essa conversão. Os mesmos estão disponíveis em vários modelos, classificados como turbinas de eixo vertical e turbinas de eixo horizontal.

Entre as turbinas de eixo vertical está a maior diversidade de modelos, dos quais pode-se destacar o rotor de Darrieus (Darrieus, 1931), o rotor de Savonius (Savonius, 1926) e o rotor H, sendo esse último uma variação do rotor de Darrieus. A figura 1 mostra o design destes três tipos de aerogeradores de eixo vertical.

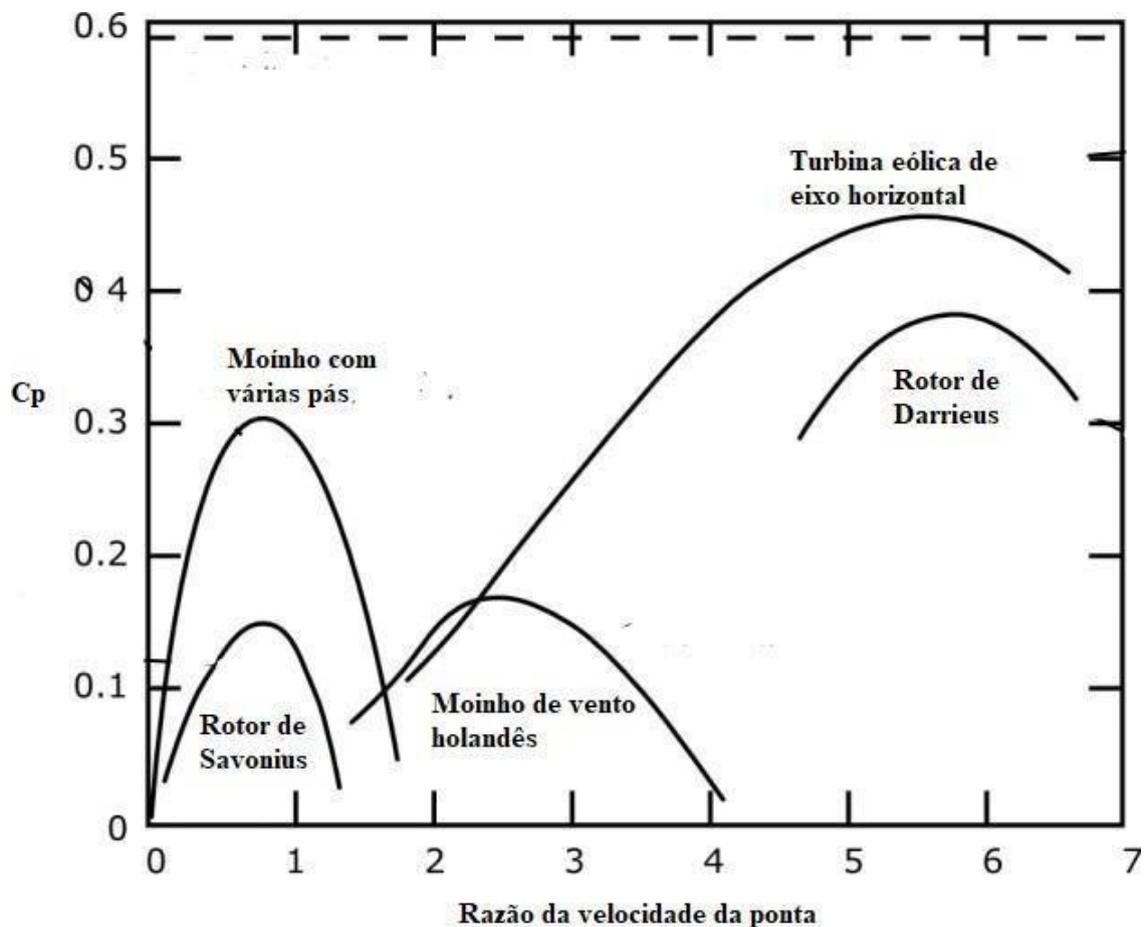
Figura 1. Modelos de aerogeradores de eixo vertical



Fonte: encurtador.com.br/hEKN6

Entretanto estes modelos de aerogeradores não são tão utilizados hoje devido a sua baixa eficiência, dando lugar a um modelo mais apropriado para fins comerciais, classificado como turbinas de giro de eixo vertical, os aerogeradores mais presentes em empreendimentos de parques eólicos. Define-se como C_p o coeficiente de potência, e este coeficiente demonstra a eficiência de um aerogerador. Na figura 2 é demonstrada a relação da velocidade de ponta de uma Hélice/Pá eólica com o C_p . Esse gráfico serve para comparar os modelos anteriormente classificados.

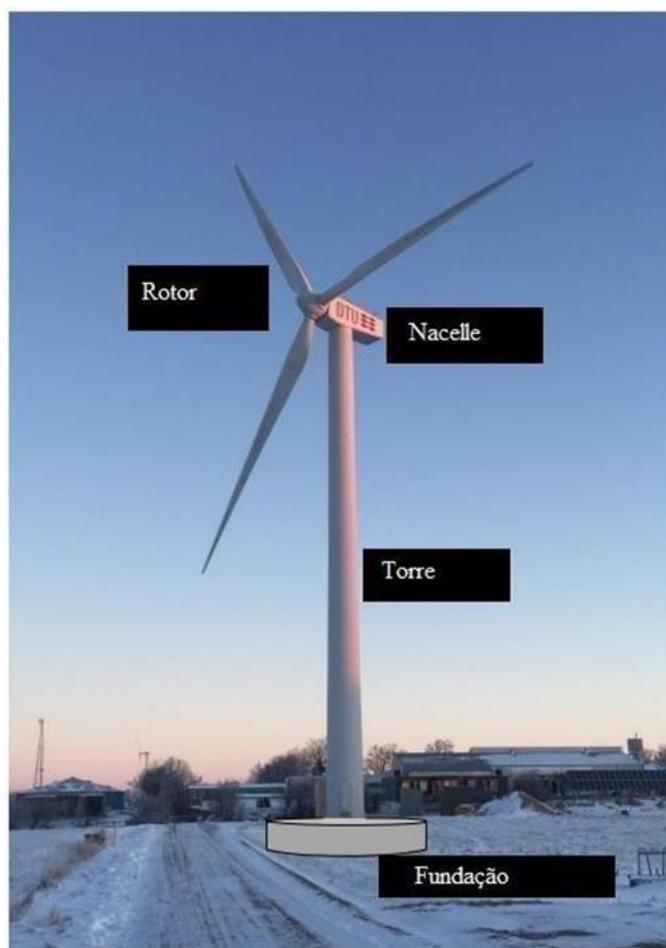
Figura 2. Relações entre a razão da velocidade de ponta e o coeficiente de potencia



Fonte: Hansen, Morten, 2014 (Adaptado)

Os aerogeradores de eixo horizontal são modelos mais eficientes e sofisticados pois estes tipos de aerogeradores além de acessarem ventos de maiores velocidades, encaram perpendicularmente o vento. Esse tipo de aerogerador tem os seguintes componentes: Fundação, torre, nacelle e rotor, como mostrado na figura 3.

Figura 3. Componentes de um aerogerador



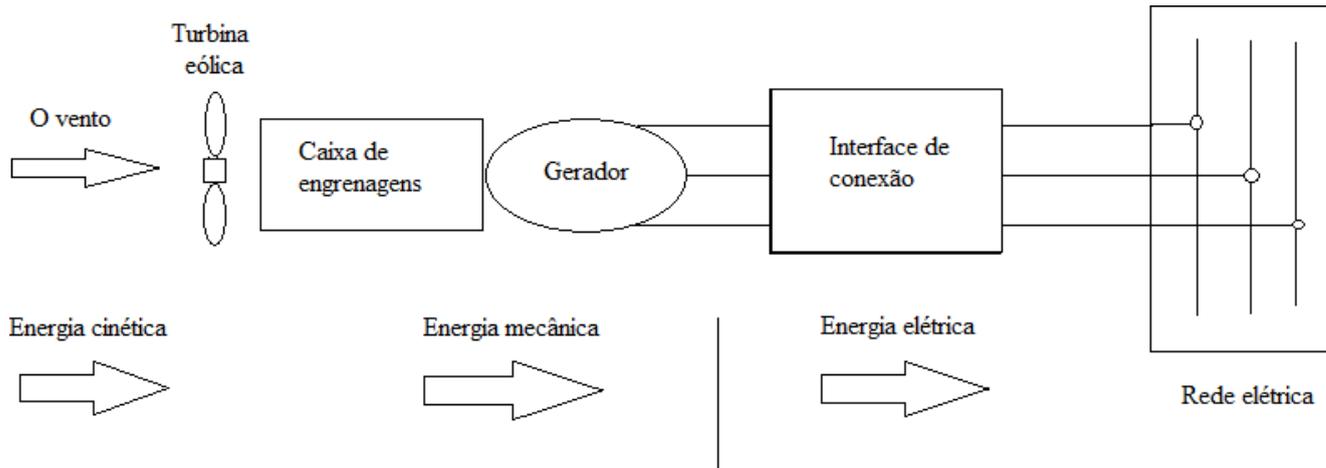
Fonte: Hansen, Morten. 2014 (Adaptado)

- Rotor: O rotor tem como seus principais componentes as pás que entram em contato com o vento, então é dado início ao processo de conversão de energia. É nesse momento que a energia cinética dos ventos se transforma em energia mecânica, fazendo o eixo do rotor, que está ligado a nacelle, girar.
- Nacelle: Este componente é onde está todo o sistema de gerador e é nele onde há a conversão em energia mecânica em energia elétrica que então é distribuída para a rede de alimentação de energia.
- Torre: É o elemento que tem como principal característica a contribuição estrutural podendo ser feita de concreto, materiais metálicos ou sendo uma estrutura mista de parte metálica parte de concreto

- Fundação: Estrutura feita de concreto armado, tem a função de ligar a torre ao solo e suportar o peso de todo o aerogerador.

A figura 4 mostra o processo de transformação de energia, começando com o contato do vento com o rotor e terminando na rede elétrica.

Figura 4. Diagrama de conversão de energia



Fonte: Milton, Pinto. Fundamentos de energia eólica, 2012.

2.2 Materiais tipicamente empregados nas pás eólicas

As pás usam de seu perfil aerodinâmico para, ao deslizar do vento em sua estrutura, o movimento ser gerado e logo ocorrer a conversão de energia. É iminente, portanto, que as pás têm um papel aerodinâmico essencial para a geração de energia. Esse elemento do aerogerador foi desenvolvido tomando emprestado os moldes da tecnologia aeronáutica, com poucas necessidades de adaptações específicas e é fabricado com as técnicas similares às empregadas na construção de barcos.

Segundo Pinto (2013), até 1915 as pás eólicas eram feitas de madeira com uma cobertura de tecido, já na década de 80, na Dinamarca, a turbina NIBE-B também tinha suas pás feitas de madeira. O projeto encontrou uma inviabilidade: a degradação da madeira e a grande necessidade de manutenção das pás, isso devido as pás eólicas estarem expostas às condições extremas da natureza. Tais intempéries como o calor do sol e a irradiação UV, chuvas e tempestades de areia são alguns dos fatores que degradam a pá e a fazem necessitar de reparos. Paralelo a isso, ainda na década de 80, o aço surgia como uma alternativa temporária de material para as asas das primeiras grandes turbinas, sem ter tanto sucesso. Diante desses episódios, aos poucos, as pás eólicas passaram a adotar, como estado da arte, materiais como a fibra de vidro e fibra de carbono (PINTO, 2013).

A fibra de vidro atende à indústria de pás eólicas, devido a sua alta resistência a esforços e baixo custo, contudo seu modo de elasticidade não é tão alto, o que restringe seu uso em grandes pás. Já a fibra de carbono preenche essa lacuna, uma vez que seu módulo de elasticidade é comparável às estruturas de aço e ainda tem uma boa resistência à fadiga. A tabela 1 mostra as propriedades mecânicas dos dois compósitos.

Tabela 1. Propriedades mecânicas da fibra de vidro e da fibra de carbono.

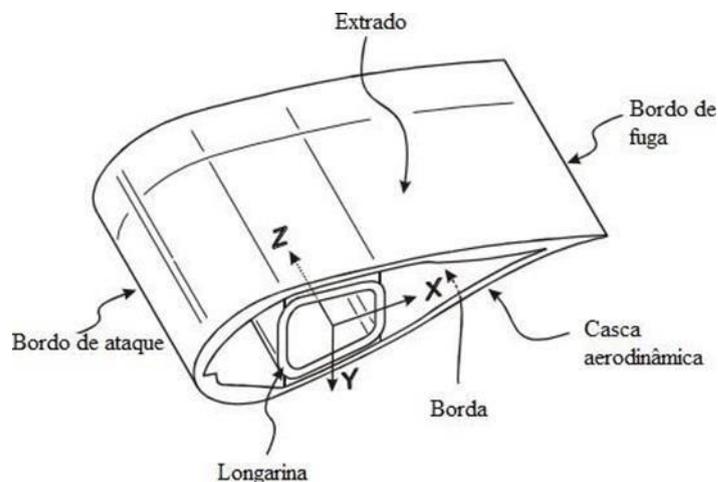
Propriedades	Fibra de Vidro	Fibra de Carbono
Densidade, ρ , (km/m^3)	24,4	13,8
Tensão máxima, S , (MPa)	4800	1700
Módulo de elasticidade, E , (GPa)	86	190

Fonte: Autoria própria.

Por questões logísticas a fibra de carbono pode ser combinada a materiais de fibra de vidro, podendo assim aumentar a resistência de áreas mais expostas a tensão. A fibra de carbono não apresenta problemas de corrosão, porém é salutar lançar mão de cuidados especiais, precavendo assim a pá do rotor contra descargas de raios.

A seguir, a figura mostra os elementos estruturais de uma pá eólica.

Fig 5. Seção transversal da pá eólica



Fonte: Branner, Kim. 2020 (Adaptado)

A casca aerodinâmica é feita de fibra de vidro revestida com epóxi e, por último, com gel coat, resultando em uma casca lisa, com pouca rugosidade para o vento (Hansen, 2008) e a longarina é

feita de fibra de carbono, para uma melhor contribuição estrutural contra a ação dos ventos e da gravidade.

2.3 Geração de ruídos

Segundo Maia (2010), o som surge a partir de uma variação de pressão do ar, gerando ondas, que uma vez geradas, se propagam pelas partículas de ar mais próximas. Ainda segundo o autor, uma vez que tal propagação das ondas aconteça, se a mesma for percebida como agradável, ou ainda contendo um significado auditivo, pode ser classificada como som, caso contrário, é então classificado como ruído.

Ainda é pertinente que outras definições sejam passadas para facilitar a compreensão da pesquisa. É o caso de nível de pressão sonora, que, como já visto, é a alteração da pressão do ar, em relação a um valor médio de pressão. São definidas as amplitudes máximas e mínimas audíveis pelo homem, respectivamente como, limiar da dor e limiar da audição, tendo um fator de 1.000.000 entre eles. A utilização de uma progressão linear para analisar esse range é considerada inviável, sendo assim, é utilizada uma relação logarítmica que permite que o range a ser trabalhado seja menor, variando assim de 0 a 120 decibéis(dB), onde 0 dB é o limiar de audição e 120 dB ao limiar da dor.

Define-se a unidade de nível de pressão sonora como decibel, sendo essa o valor da razão entre o valor de pressão medido e o valor de referência.

Outro conceito importante é o da frequência, isso porque essa grandeza física tem uma aplicação muito importante no entendimento de propagação sonora. Medida em Hertz, a frequência quantifica a ocorrência de flutuações de pressão, no tempo. Como o ser humano consegue perceber frequências entre 20 Hz e 20 kHz, há uma gama muito grande de valores a serem observados para uma análise, por isso, este grande intervalo é dividido em oitavas de banda, ou ainda, aumentando a discretização, terça de banda, com isso possibilitando que a propagação do ruído não se seja observada em uma frequência específica, em que o valor pode ser alterado rapidamente, mas em uma faixa de valores de frequência.

2.4 Geração de ruídos em parques eólicos

Devido ao fato de o aerogerador estar constantemente em giro, o mesmo produz ruído, devido as interações entre suas peças e até mesmo devido as suas interações com o ar. Tais ruídos, segundo Pinto (2013), podem ser categorizados em dois grupos, as saber: ruído mecânico e ruído aerodinâmico.

O ruído mecânico, como descrito anteriormente, se dá, em sua maior contribuição, pela interação entre as peças. Esse processo se dá na nacele, onde estão a caixa de engrenagem, que é a principal fonte de ruídos, o gerador, que em meio aos seus processos também tem uma contribuição considerável na geração de ruídos e, por fim, o sistema de resfriamento e outros itens auxiliares, esses capazes de gerar um menor nível de ruído.

Pinto (2013) afirma que os ruídos e vibrações presentes na caixa de engrenagens se devem a um erro na malha do sistema de conversão-transmissão. Basicamente o ruído transmitido pela caixa de engrenagens depende do modelo das engrenagens que estão interagindo e da precisão com que a engrenagem está posicionada, pois nem sempre é possível que a mesma esteja posicionada exatamente. Afim de mitigar essa propagação que se origina na nacele, é possível colocar um isolamento acústico na mesma.

Já o ruído aerodinâmico se dá pela interação da pá eólica com o vento e pode ser classificado em seis categorias distintas, que são o ruído de borda de fuga, o ruído de separação por estol, o ruído de separação de vórtices de ponta, o ruído do cisalhamento do vórtice da camada limite, o ruído de cisalhamento da aspereza do vórtice da borda de fuga e o ruído de turbulência de escoamento de aproximação. Cada um desses ruídos com os seus diferentes procedimentos de cálculo.

2.5 Impacto ambiental

Segundo Pinto (2013), os ruídos emitidos pelos parques eólicos podem causar prejuízos à saúde humana, isso porque uma turbina eólica pode gerar ruídos capazes de causar náusea e dor de cabeça. Há algumas características dos aerogeradores que ajudam a explicar isso, como a sua geração constante de ruídos em baixa intensidade de frequência (cerca de 20 Hz, ou seja, ultrassom), além do fato do aerogerador gerar uma variação de pressão do ar de 40 dB, se medida a 300 metros de distância, sendo que valores próximos a 60 dB já podem gerar irritações.

2.6 Tecnologia SIG

Ao longo dos anos com o avanço das ferramentas de mapeamento como Google Maps e Google Earth, o uso das tecnologias de geoprocessamento tem tido seu uso difundido. As ferramentas SIG (Sistemas de Informação Geográfica) surgem como um ramo das geotecnologias ao qual essa pesquisa se debruça. A figura 6 mostra o nível de abrangência da tecnologia SIG.

Figura 6. Relação entre o Geoprocessamento e as Geotecnologias.



Fonte: Medeiros (2012)

Segundo (TEIXEIRA, 1995), a tecnologia SIG compreende softwares, hardwares específicos além de metodologias aplicadas, dados tratados, coletores de dados GPS, utilizando uma ampla gama de informações para gerar simulações de ordem espacial.

2.7 Software QGIS

O Software QGIS é onde o script da pesquisa é implementado. Esse software foi desenvolvido pela Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) e é licenciado pela licença pública geral GNU. O QGIS está disponível em código aberto e é compatível com Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android. Ele conta com diversas funcionalidades capazes de manipular dados matriciais (Raster's) e dados vetoriais, os vetores. Por ser um código aberto e compatível com as principais plataformas, o QGIS ganhou grande repercussão no mundo da tecnologia SIG e hoje conta com uma grande comunidade de desenvolvedores externos que contribuem para o surgimento de novas ferramentas, bem como o aprimoramento de ferramentas mais antigas do software. Ainda sobre o QGIS, o mesmo é capaz de executar códigos na linguagem Python, uma linguagem de fácil aprendizagem e que otimiza a criação de rotinas de processos neste Software.

2.8 Linguagem Python

A linguagem Python tem como características o fato de ser uma linguagem indentada, ou seja, com códigos organizados e de fácil leitura. Essa característica facilita a leitura pormenorizada do

script, uma vez que fica mais fácil identificar estruturas de repetição, decisão, objetos, funções, dentre outras estruturas. A linguagem também é classificada como linguagem de alto nível, o que quer dizer que a mesma tem uma sintaxe mais próxima da “linguagem humana”, em detrimento da “linguagem da máquina”. Python é uma linguagem orientada a objeto, o que a capacita a criar classes que contem características fixas que podem ser adaptadas para cada objeto criado (CRUZ, 2015).

Por ser uma linguagem moderna e de fácil escrita, capaz de integrar várias tecnologias, sua utilização no geoprocessamento é indispensável quando o objetivo é criar rotinas de processos que envolvam manipulação de dados vetoriais e matriciais além de ser capaz de acessar bancos de dados e ser compatível com as API's dos mais importantes softwares. Assim como o QGIS, a linguagem conta com uma comunidade de usuários muito grande, o que possibilita o surgimento contínuo de novas tecnologias, o que resulta em uma maior capacidade da linguagem resolver variados tipos de problema, e isso é bem-vindo no geoprocessamento, uma vez que esse tipo de tecnologia utiliza vários tipos de dados para gerar informações geográficas.

2.9 Propagação do ruído

O modelo de propagação de ruído sonoro, através de uma fonte, medido em um ponto receptor, bem como todas as equações demonstradas nesta pesquisa, é dado pela seguinte equação (ISO, 1996).

$$L_{ft}(DW) = L_w + D_c - A$$

L_w: Nível de potência sonora [dB]

D_c: Correção diretiva, que é igual a zero [dB]

A: Atenuação [dB]

Onde a atenuação sonora, em decibéis (dB), é dada por:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc}$$

A_{div}: Atenuação pelo espalhamento esférico

A_{atm}: Atenuação pela absorção atmosférica

A_{gr}: Atenuação pela cobertura de solo

A_{bar}: Atenuação pela presença de barreiras

Amisc: Atenuação pela miscelânea de efeitos

O ruído emitido por uma fonte, ao ser propagado no espaço, começa a ter diferentes formas de interação com tudo o que há a sua volta, deste modo, é notório que tal fenômeno físico pode ser descrito como um fenômeno complexo, devido a abrangência de fatores que podem contribuir com a atenuação sonora. Neste trabalho, o fenômeno é modelado considerando as formas de atenuação devido ao espalhamento esférico, absorção atmosférica, interação com a vegetação, com as barreiras topográficas e com a influência do vento. Essas formas de atenuação correspondem ao modelo do SPreAD-GIS, que se assemelha às formas de atenuação descritas na ISO 9613-2, sendo que a versão do SPreAD-GIS conta com algumas adaptações, dentre as tais, destaca-se a substituição da atenuação pela miscelânea de efeitos pela atenuação devido à influência do vento, o que simplifica o problema.

2.9.1 Espalhamento esférico

O espalhamento esférico é a forma mais simples de atenuação presente no modelo e consiste na perda de pressão sonora em um cenário em que não há rugosidade no solo, não há influência atmosférica, influência de temperatura ou qualquer outra forma de interação que represente obstáculo para a onda, ou seja, essa atenuação é inerente à propagação sonora e, uma vez que a onda percorre o espaço, cada vez mais, a mesma vai perdendo força, ou seja sendo atenuada, pois sua energia é dissipada, desse modo, o fenômeno está sempre em função da distância em que a onda percorre, e o ruído analisado é o que foi contabilizado a partir de uma distância de referência, sendo modelado pela seguinte equação

$$d_{div} = [20 \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11] \text{ dB}$$

d: Distância entre a fonte emissora e o receptor [m]

d0: Distância de referência [m]

A versão SIG dessa equação, ou seja, sua aplicação em software SIG, como base para simulação, resulta em um arquivo tipo raster (.tif) que mapeia a atenuação, de forma radial. A imagem 7 contém esse arquivo, bem como uma legenda contendo a magnitude de atenuação, em decibéis (dB).

2.9.2 Absorção atmosférica

A absorção atmosférica leva em conta a interação que a onda tem com a atmosfera, sendo assim, essa forma de atenuação tem como 'barreira' a atmosfera e suas características, que diz respeito, principalmente à humidade e a temperatura. A onda vai sendo amortecida de forma gradual, à medida que a mesma vai percorrendo o espaço, sendo assim, a absorção atmosférica se dá em função da atmosfera e da distância.

$$A_{atm} = \frac{\alpha d}{1000} \text{ dB}$$

α : Coeficiente de atenuação atmosférica [dB/km]

d : Distância entre a fonte emissora e o receptor [m]

A versão SIG desse modelo matemático determina, via linha de código, o coeficiente alpha, isso se dá por meio de uma função e após a determinação do coeficiente alpha, o resultado é incorporado ao cálculo da perda por absorção atmosférica e, após isso, o arquivo .tif é gerado. A imagem 8 é o resultado dessa etapa da simulação.

2.9.3 Interação com a vegetação

A interação da onda e a vegetação é também caracterizada como uma interação atenuadora. No algoritmo desenvolvido nesta pesquisa, esse fenômeno é retratado também de maneira radial, porém, nesse caso, o desempenho da atenuação não está em função da distância. Por se tratar de um fenômeno de elevada complexidade, o mesmo é retratado, segundo a norma, de forma inviável, tanto pela complexidade, quanto pelo custo computacional, sendo assim, foi necessário lançar mão do modelo alternativo do fenômeno, dado pela seguinte equação (ISO, 1996):

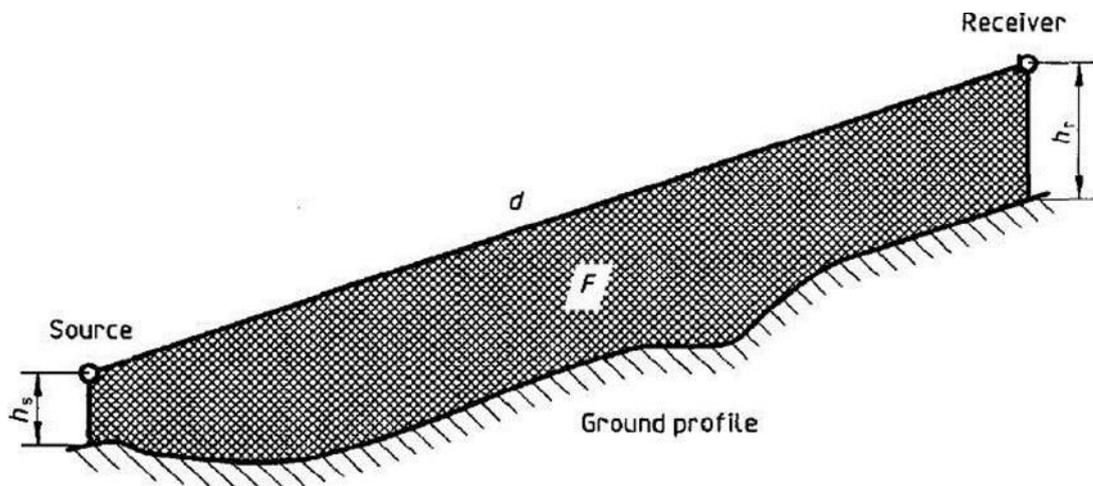
$$A_{gr} = 4.8 - (2h_m/d)[17 + (\frac{300}{f_{ator}})] \geq 0 \text{ dB}$$

d : Distância entre a fonte e o receptor (m)

h_m : Área entre a fonte e o receptor, obtida através da área formada entre os pontos mais altos dos mesmos e o chão.

Para aumentar a compreensão do cálculo de h_m , é necessário partir da ilustração fornecida pela norma. A figura 9 mostra a área h_m .

Figura 7. Área entre a fonte e o receptor.



Fonte: ISO 9613-2, 1996.

Porém, na aplicação feita no presente trabalho, para fins de adaptação, foi utilizado um raster descrevendo a altimetria do terreno, ou seja, os dados de altura de cada ponto do terreno e, a partir de uma média de altura, dentro de um intervalo, obter a atenuação em dB do ruído sonoro. A figura 10 mostra o raster resultante dessa etapa da simulação.

2.9.4 Interação com as barreiras topográficas

Seguindo ainda a norma, tem-se a atenuação devido a interação com as barreiras topográficas. Essa atenuação se dá devido às características do solo em torno da fonte sonora, tais como topografia e rugosidade do mesmo. A aplicação SIG feita nessa pesquisa se baseia em dados já obtidos na aplicação do fenômeno anterior, e é implementado a partir das seguintes equações:

$$A_{bar} = D_z - A_{gr} > 0$$

D_z : Atenuação de barreira para cada oitava banda (dB)

$$D_z = 10 \lg \left[3 + \left(\frac{C_2}{\lambda} \right) C_{3z} K_{met} \right] \text{ dB}$$

C_2 : Constante de propagação

λ : Comprimento de onda (m)

C_3 : Coeficiente de propagação em função da frequência

z : Distância entre dois pontos de difração (m)

K_{met} : Fator de correção meteorológica

$$C_3 = \frac{(1 + (\frac{5\lambda}{e})^2)}{\frac{1}{3} + (\frac{5\lambda}{e})^2}$$

$$z = [(d_{ss} + d_{sr} + e)^2 + a^2]^{1/2} - d$$

e : Distância entre duas barreiras (m)

d_{ss} : Distância entre a fonte e o primeiro ponto de difração (m)

d_{sr} : Distância entre a fonte e o segundo ponto de difração (m)

a : Distância paralela (em linha reta) entre a fonte e o receptor (m)

$$K_{met} = \exp \left[\left(-\frac{1}{2000} \right) \left(\frac{d_{ss}d_{sr}}{2z} \right)^{1/2} \right], \text{ se } z > 0$$

$$K_{met} = 1 \text{ se } z \leq 0$$

O comportamento dessa forma de atenuação segue um padrão parecido com os anteriores. Tal comportamento implementado nesse modelo é apresentado no arquivo (.tif) mostrado na figura 11.

2.9.5 Influencia do vento

A interação da onda sonora com o vento não se limita apenas a possibilidade de haver uma atenuação, mas uma mudança de comportamento, isso porque, caso a onda esteja a favor do vento, a mesma pode demorar mais para ser atenuada ou, até mesmo, a onda pode aumentar seu som, já no caso em que a propagação sonora ocorre contra a direção do vento, a onda pode rapidamente ser atenuada. As condições desse modelo que podem influenciar a propagação sonora são a direção predominante do vento, a velocidade do mesmo e as condições sazonais que podem estar incluídas no modelo, a exemplo de chuva, ventos bravios e etcetera. O fenômeno físico aqui parte de um algoritmo usado no SPreAD-GIS, ou seja, parte de uma rotina automatizada SIG.

3. Metodologia

Visando atingir os objetivos da pesquisa, foi realizada uma simulação considerando um parque eólico no município de Macau, Rio Grande do Norte. Os dados fornecidos para caracterizar o ambiente, são arquivos do tipo raster, dentre os tais estão dados de altimetria, dados de temperatura, dados de umidade e velocidade média dos ventos. Os demais arquivos são do tipo vetor e foram utilizados para delimitar a área de estudo e a localização do aerogerador. A partir de algumas dessas informações, foi possível gerar um raster/arquivo matricial de distância (dentre outros), em metros, que, posteriormente viria a ser utilizado na implementação das equações da ISO 9613-2.

A máquina escolhida para ser caracterizada nesta pesquisa é do mesmo modelo da que é utilizada no parque eólico de Macau. A tabela 2 mostra os dados de ruído emitido (em dBA) para dadas velocidades de vento e faixas de frequência.

Tabela 2. Tabela de ruído emitido, para cada terça de oitava, em cada velocidade.

Frequência central	Ruído com a velocidade de vento de 5 m/s (dBA)	Ruído com a velocidade de vento de 6 m/s (dBA)	Ruído com a velocidade de vento de 7 m/s (dBA)
50	22,8 ± 3,5	25,5 ± 2,9	26,4 ± 2,1
63	26,6 ± 3,2	29,0 ± 2,8	30,4 ± 2,2
80	31,7 ± 2,0	32,4 ± 2,3	34,1 ± 2,5
100	37,5 ± 4,8	41,3 ± 3,6	42,7 ± 2,1
125	34,3* ± 4,9	39,1 ± 3,9	41,0 ± 2,2
160	35,5 ± 4,7	39,7 ± 4,0	41,8 ± 2,3
200	37,9 ± 5,1	42,3 ± 3,9	43,8 ± 2,1
250	40,1 ± 5,0	44,3 ± 3,7	45,6 ± 1,9
315	41,9 ± 4,9	45,8 ± 3,5	46,9 ± 1,9
400	42,5 ± 4,5	45,9 ± 3,2	46,8 ± 1,8
500	42,7 ± 4,6	46,2 ± 3,3	47,1 ± 1,9
630	42,0 ± 4,1	45,0 ± 3,0	45,7 ± 1,9
800	41,6 ± 3,7	44,1 ± 2,7	44,7 ± 1,9
1,000	40,2 ± 3,6	42,7 ± 2,8	43,4 ± 2,1
1,250	38,6 ± 3,6	41,1 ± 2,8	42,0 ± 2,1
1,600	36,6 ± 3,8	39,3 ± 3,0	40,3 ± 2,2
2,000	33,9 ± 4,2	36,9 ± 3,0	37,6 ± 2,0
2,500	31,5 ± 4,2	34,7 ± 3,1	35,5 ± 2,0
3,150	29,3 ± 4,5	33,0 ± 3,3	33,8 ± 2,0
4,000	26,3* ± 4,5	30,3 ± 3,4	31,3 ± 2,0
5,000	24,1* ± 4,0	27,0* ± 3,4	28,5* ± 2,3
6,300	NR	NR	NR
8,000	NR	NR	NR
10,000	NR	NR	NR

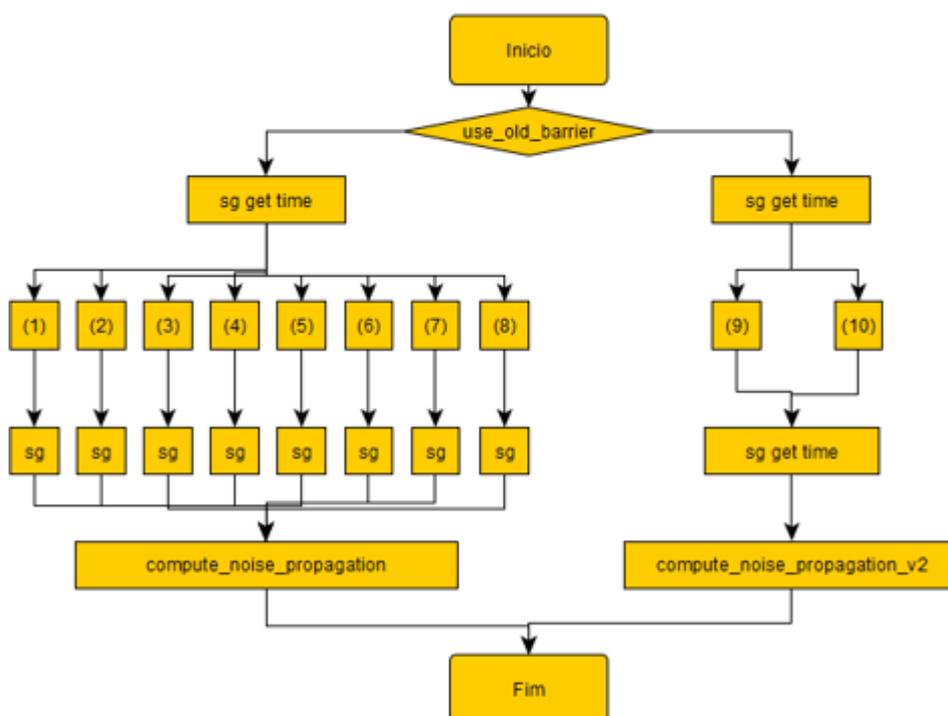
Fonte: Dados disponibilizados pelo ISI

A pesquisa seguiu ainda com a análise do script do SPreADGIS, gerando assim um fluxograma que demonstra como o software está organizado, deixando claro como suas funções se relacionam. Na análise foi constatado que a função `noisepropagationonepoint()` e a função `spreadgis()` tem como seus objetivos, respectivamente, agrupar todas as funções que estão relacionadas aos fenômenos físicos da simulação, e receber os dados da interface, relacionando- os entre si e entre as funções.

A figura 13 e a figura 14 mostram os fluxogramas dessas funções.

Figura 8. Fluxograma da função `NoisePropagationOnePoint`.

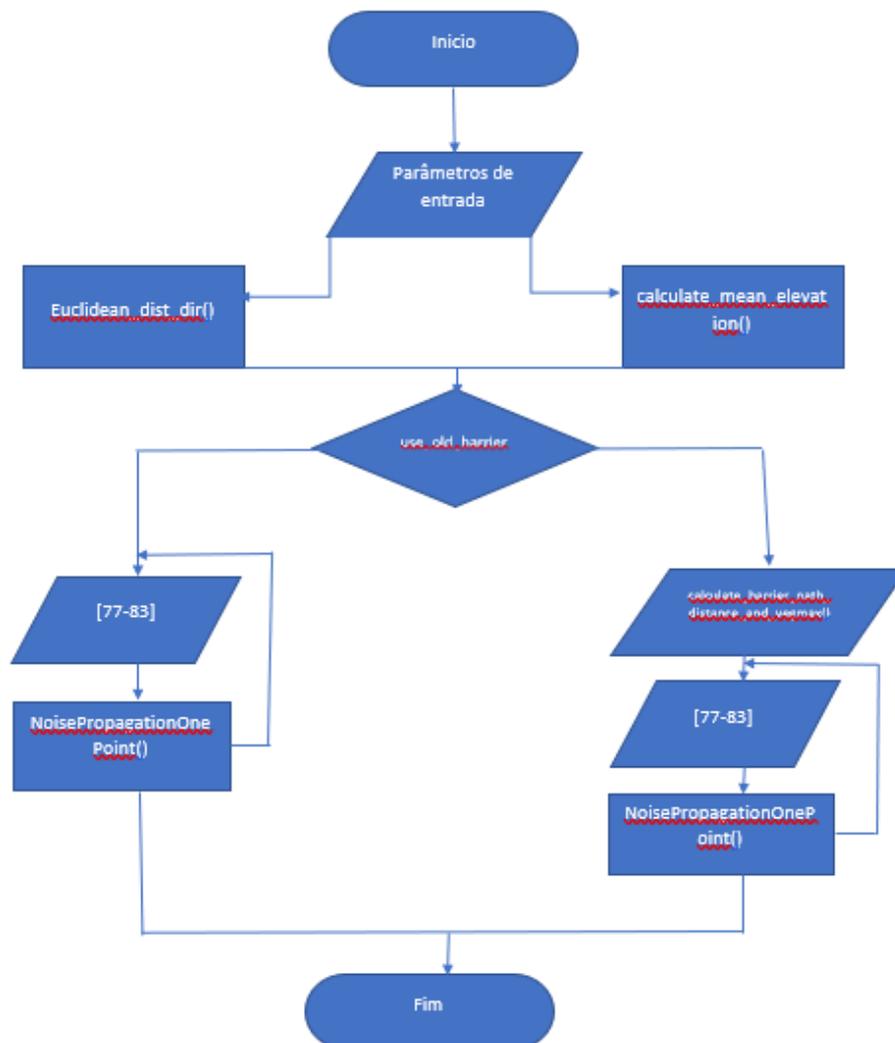
`def NoisePropagationOnePoint()`



Fonte: Autoria própria

Figura 9. Fluxograma da função spreadgis.

def spreadgis() - Fluxograma



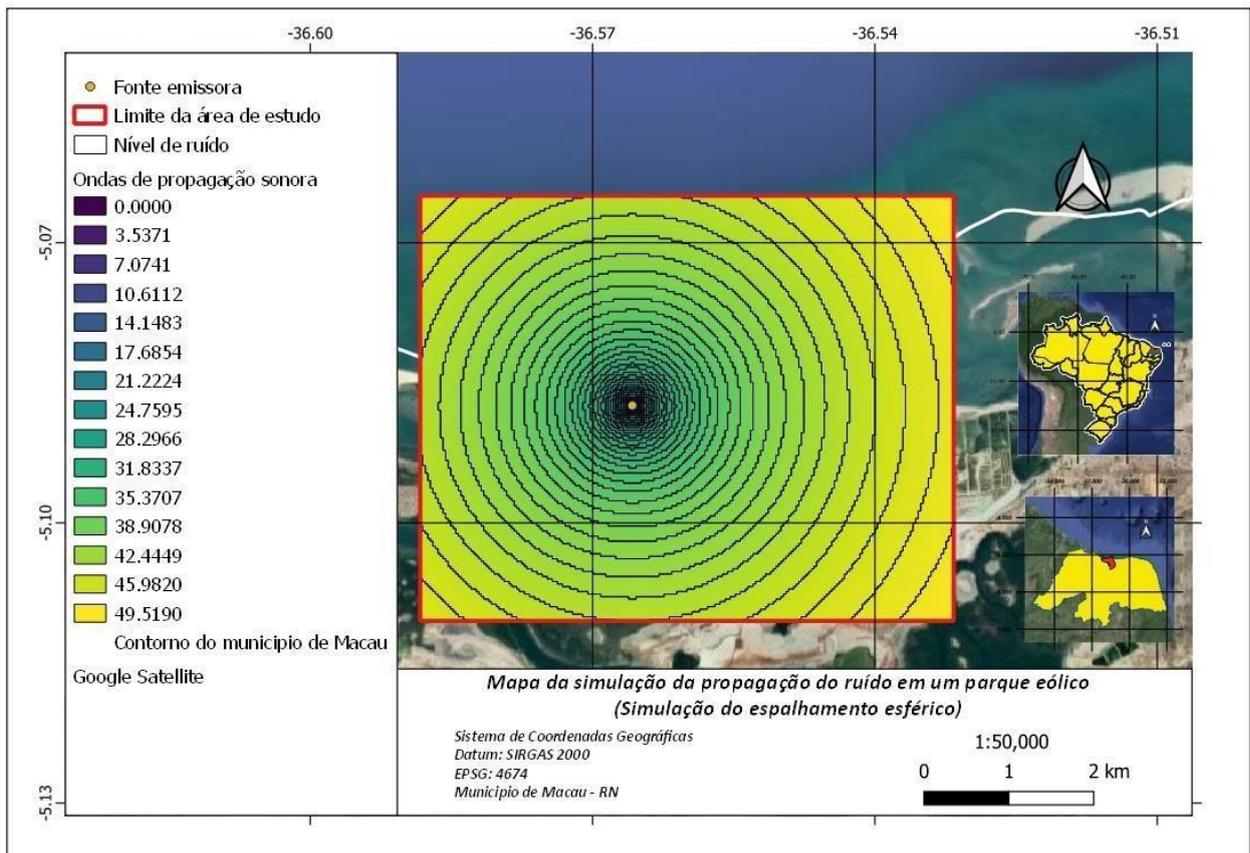
Fonte: Autoria própria.

4. Resultados e Discussão

Percebendo a proposta inicial da pesquisa, de gerar um *script* capaz de simular a propagação sonora, considerando agora os efeitos do espalhamento esférico, absorção atmosférica, interação com a cobertura de solo e interação com as barreiras topográficas. O código que foi desenvolvido é capaz de manipular informações de geoprocessamento e gera um arquivo Raster, do tipo .TIF que descreve o comportamento da ondasonora no espaço.

A figura 15 é o arquivo Raster gerado, com um ponto central, representando a fonte sonora, (o aerogerador), a sua volta está, em gradiente, o efeito que o espalhamento esférico exerce sobre a onda e, por fim, a barra lateral exhibe, em escala de cores, os níveis de decaimento sonoro.

Figura 10. Resultado da atenuação devido ao espalhamento esférico.



Fonte: Autoria própria.

Figura 11. Resultado da atenuação devido à absorção atmosférica.

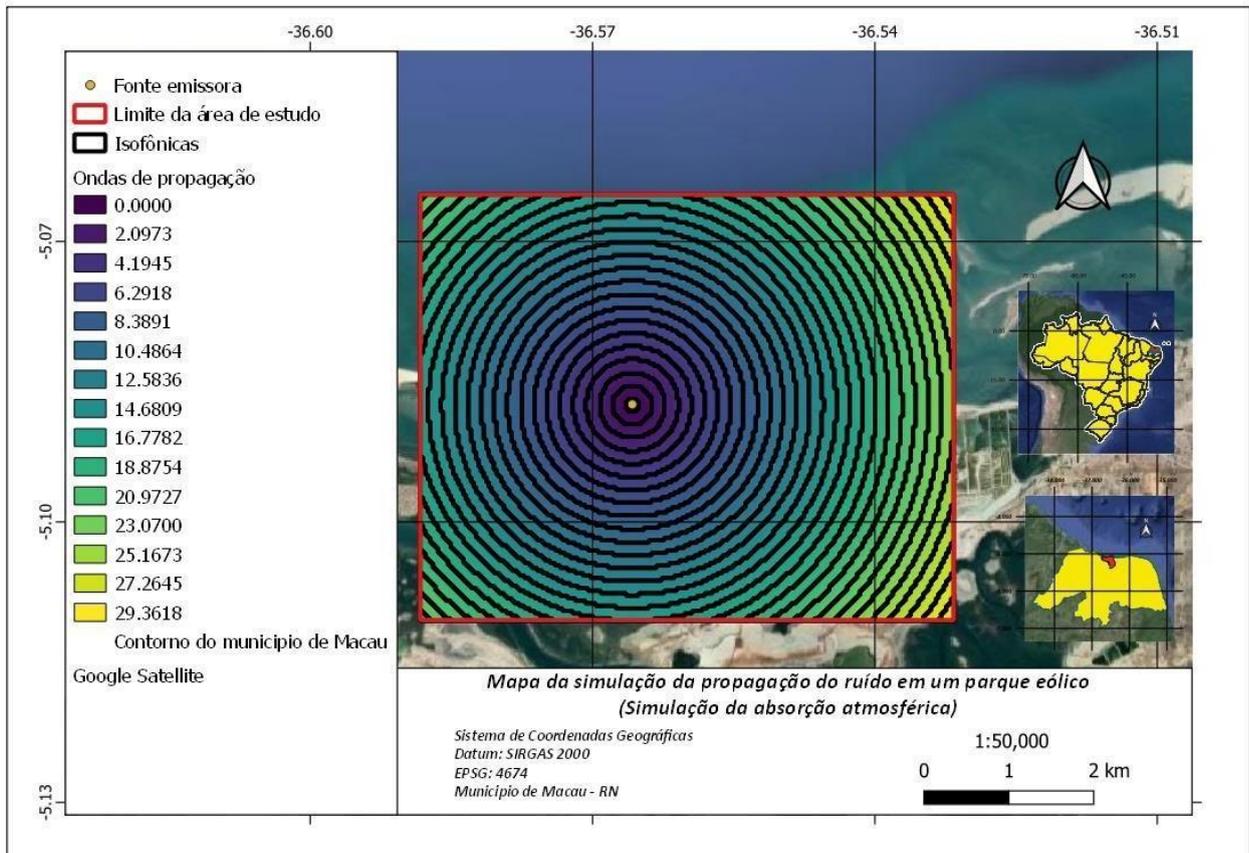
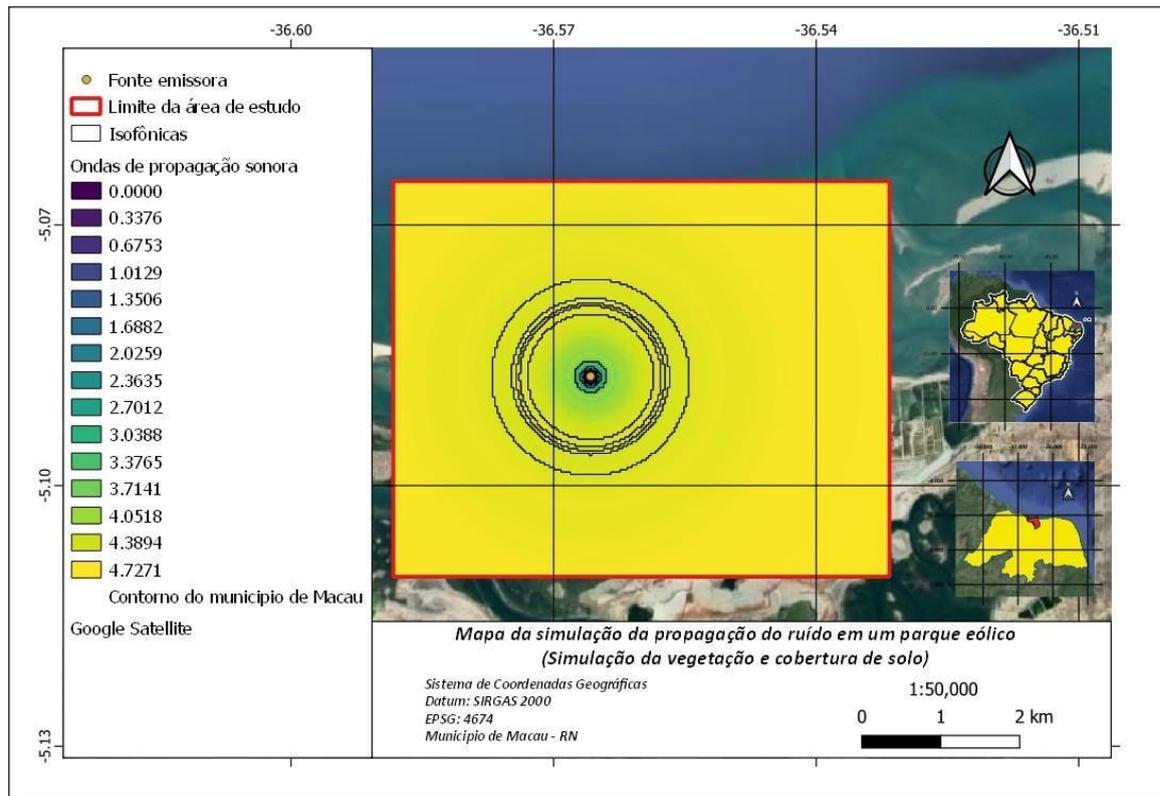
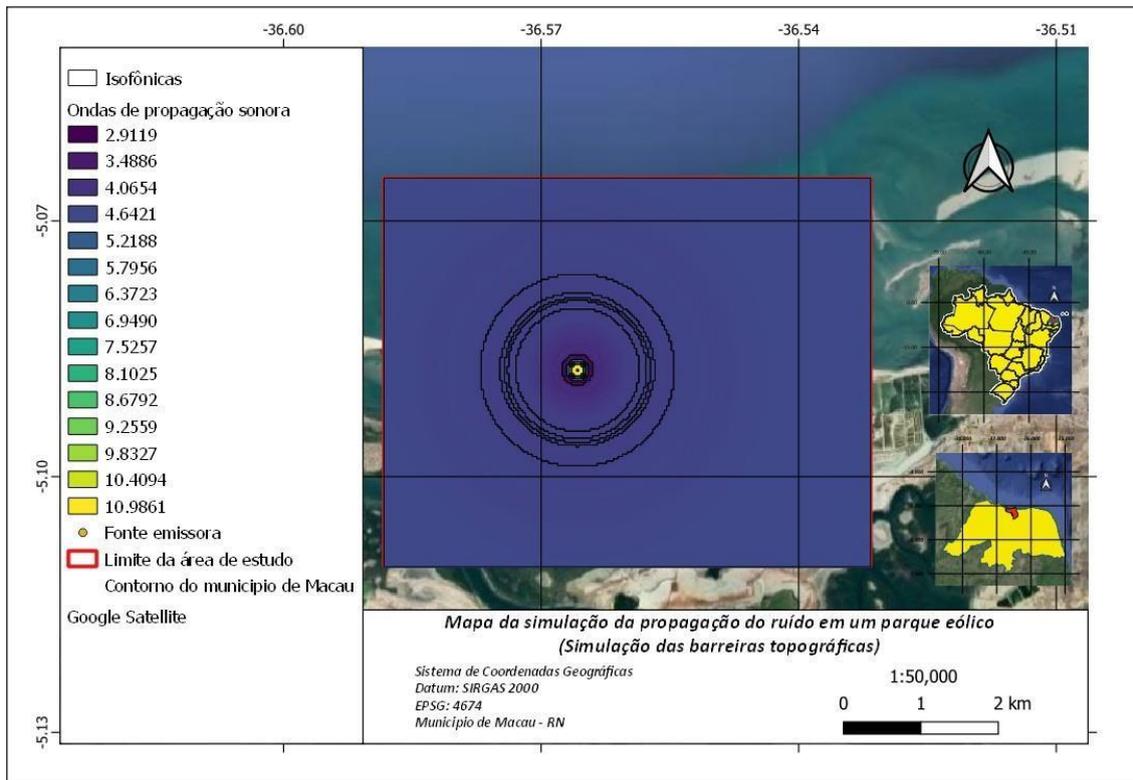


Figura 12. Resultado da atenuação devido à vegetação.



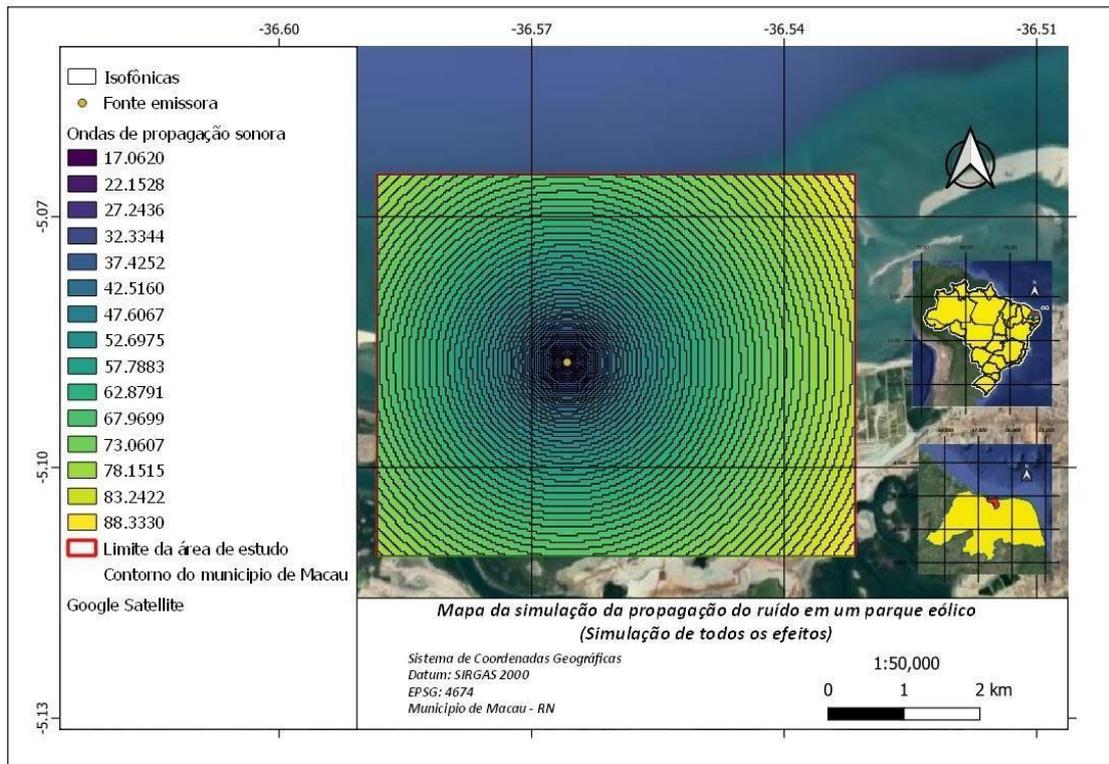
Fonte: Autoria própria.

Figura 13. Resultado da atenuação devido às barreiras topográficas.



Fonte: Autoria própria.

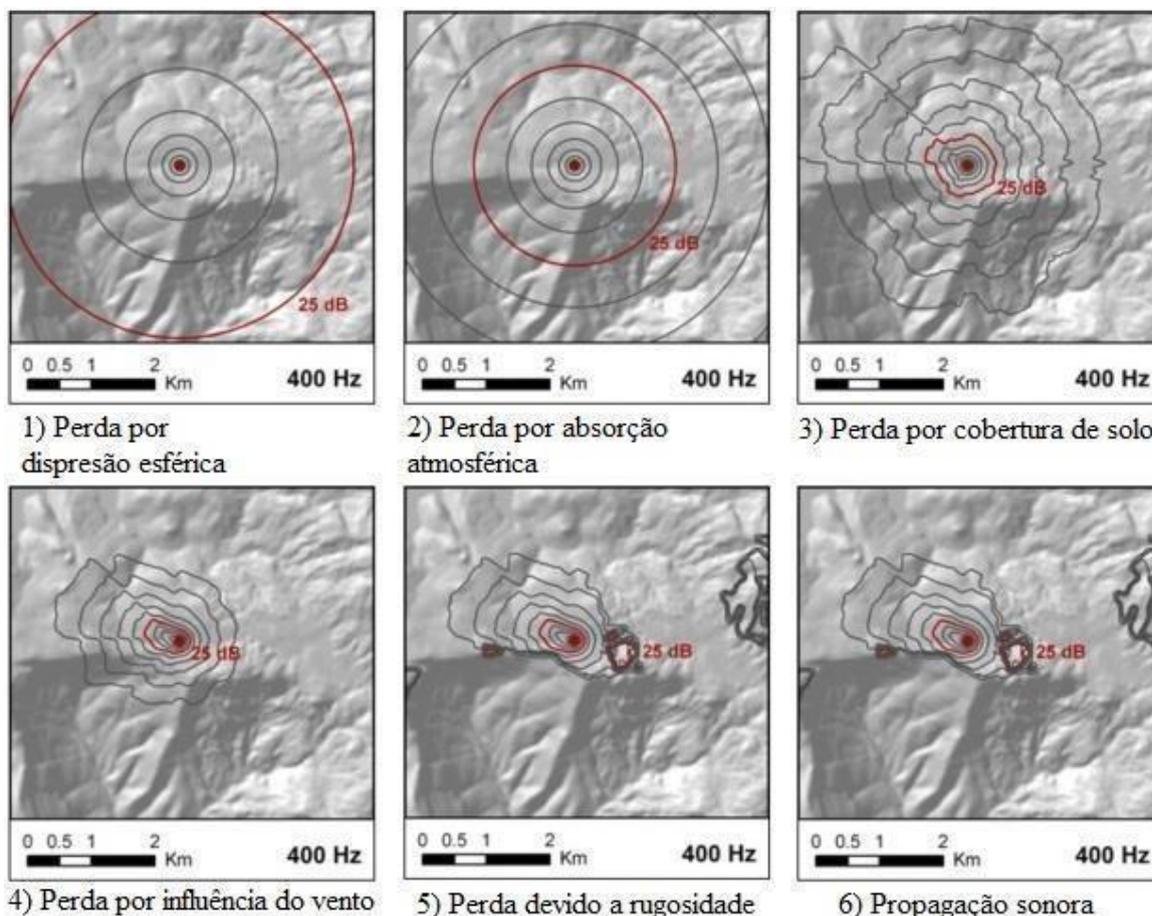
Figura 14. Raster resultante da simulação.



Fonte: Autoria própria

Posteriormente mais fatores serão agregados ao código, como o efeito de atenuação sonora devido ao vento, características de ruído do ambiente, caracterização do ruído emitido pela fonte, interface amigável e a produção automática do relatório. A figura 16 mostra os resultados obtidos pelo Arc-GIS, inicialmente este era o objetivo do código, porém, durante a adaptação do algoritmo para a API do QGIS, foi observado que algumas ferramentas disponíveis no software prioritário não se encontravam disponíveis na API do QGIS, sendo assim, foi necessário reconsiderar a estrutura dos scripts, o que justifica a diferença no comportamento dos resultados. Os resultados do Arc-GIS estão presentes na figura 16.

Figura 15. Resultados do SPreAD-GIS



Fonte: SOUND Mapping Tools User's Guide (2017)

5. Conclusão

O presente trabalho se mostrou satisfatório no que diz respeito a atender a indústria eólica, implementado, sobretudo as normas ISO 9613-1 e 9613-2, utilizando a linguagem Python. A contribuição da presente pesquisa foi gerar um código capaz de simular o espalhamento esférico, a absorção da atmosfera, a interação com a vegetação e a interação com o solo. Quanto a influência dos ventos, foi constatada a inviabilidade de realização desta, uma vez que a API do QGIS não reunia recursos suficientes para replicar esse fenômeno.

Ao comparar os resultados com os oferecidos pelo Spread – GIS, foi detectada a necessidade de aprimoramento do algoritmo. Com isso, o código pode servir como ponto de partida para futuras pesquisas voltadas para essa área.

6. Referências

1. ABEEÓLICA. [S. I.], 2020. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 30 jan. 2021.
2. BOLETIM ANUAL DE GERAÇÃO EÓLICA 2019. [S. I.]: ABEEólica, 2019- . Anual. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/?s=Boletim>. Acesso em: 30 jan. 2021.
3. Savonius, Sigurd J. The Wing-Rotor in Theory and Practice. Savonius & Co., 1925.
4. Hansen, Martin. Aerodynamics of Wind Turbines. Earthscan, 2008.
5. Keegan, M. H., et al. "On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades". Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 46, no 38, setembro de 2013, p. 383001. DOI.org (Crossref), doi:10.1088/0022-3727/46/38/383001.
6. PINTO, Milton. Fundamentos de Energia Eólica. [S. I.]: Grupo Gen - LTC, 2013.
7. MAIA, Daniel Sérgio Névoa. Ruído em parques eólicos: análise e caracterização. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Especialização em Construções, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (Feup), Porto, 2010.
8. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 9613-2: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors. Genebra, Suíça: Iso, 1996.
9. ANEEL. Matriz Energética Brasileira. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoieNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>.
10. PYTHON. In: Python Org. Versão 3.7. [S. I.]: Python Org, 2018.
11. SPREAD-GIS. In: SPreAD-GIS. 4.4. [S. I.]: Harrison et. al, 2017. Archive.
12. QGIS. In: QGIS Org. Versão 3.18 Zürich. [S. I.]: QGIS Org, 2021.
13. ARCGIS. In: ESRI. Versão 10.4. [S. I.]: ESRI, 2016.
14. SOUND Mapping Tools User's Guide: Version 4.4. [S. I.: s. n.], 2017.