



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA  
BAHIA (IFBA), CAMPUS JEQUIÉ**

Gustavo Lima da Silva

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DO AEROGERADOR SEM PÁS: UM  
ESTUDO DE CASO NO INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA – CAMPUS  
JEQUIÉ.**

Jequié-BA  
2024

Gustavo Lima da Silva

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DO AEROGERADOR SEM PÁS: UM ESTUDO DE CASO NO INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA – CAMPUS JEQUIÉ.**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à disciplina de TCC, aos docentes Fabiano Borges e Rita Queiroz como requisito parcial para conclusão do curso.

**Comissão Examinadora**

---

Prof. Dr. Márcio Andrade Rocha - IFBA/Jequié

---

Prof. Dr. Nelson José Bonfim Dantas - IFBA/Jequié

---

Prof. Me. Cândido Requião Ferreira - UESB/Jequié

Jequié-BA  
2024

# Resumo

Com o constante aumento da demanda energética, a capacidade de geração de energia eólica serve como alternativa para complementar a matriz energética. As turbinas eólicas normalmente têm duas ou três pás, gerando eletricidade com velocidades de vento mais altas e em alturas maiores. A turbina eólica sem pás, Vórtex Tacoma, é uma nova tecnologia em desenvolvimento. Aproveita ventos de baixa velocidade e possui estrutura compacta, tornando-o adequado para instalação em áreas urbanas como casas e edifícios. O equipamento é composto por uma base fixa e um mastro ressonante. O design não aerodinâmico do mastro maximiza as instabilidades aerodinâmicas e a turbulência do vento, melhorando a captura de energia, que ocorre através da oscilação do mastro à medida que o vento flui ao redor da estrutura, criando um padrão de pequenos vórtices de von Kármán. O objetivo deste estudo é realizar um estudo de caso analisando a viabilidade técnica do aerogerador sem pás do Instituto Federal da Bahia – Campus Jequié para geração de energia limpa. A metodologia abrange a pesquisa e avaliação de bases de dados relevantes, a realização e análise da altimetria do IFBA, a realização e avaliação de simulações utilizando o Ansys Fluent e a análise e identificação de viabilidade técnica. Os resultados incluem a altimetria do campus e a velocidade do vento excedendo o requisito mínimo para operação da turbina, conforme evidenciado pelas simulações da Ansys revelando a liberação de vórtices desses mastros ressonantes. A seleção da Vórtex Tacoma foi baseada na comparação com outros dois modelos de turbinas, destacando-se pelo custo, manutenção, tamanho e potência. Com base nessas simulações e nas médias dos dados do anemômetro, foi identificado o arranjo ideal para a instalação do Vórtex. Além disso, o uso de múltiplas turbinas Vórtex próximas aumenta o ganho de energia devido à redução dos requisitos de espaço e ao efeito de esteira de desprendimento de vórtices. Esses resultados preliminares indicam a viabilidade técnica do aerogerador sem pás do Instituto Federal da Bahia - Campus Jequié, oferecendo uma solução potencial para geração de energia limpa em áreas urbanas. Uma análise mais aprofundada e a implementação de múltiplas unidades poderão contribuir significativamente para a sustentabilidade energética da instituição e da região envolvente.

**Palavras-chave:** Energia, Sustentabilidade, Vortex.

# Abstract

With the constant increase in energy demand, the capacity for wind energy generation serves as an alternative to complement the energy matrix. Wind turbines typically have two or three blades, generating electricity with higher wind speeds and at greater heights. The bladeless wind turbine, Vortex Tacoma, is a new technology in development. It harnesses low-speed winds and has a compact structure, making it suitable for installation in urban areas such as houses and buildings. The equipment consists of a fixed base and a resonant mast. The non-aerodynamic design of the mast maximizes aerodynamic instabilities and wind turbulence, improving energy capture, which occurs through the mast's oscillation as the wind flows around the structure, creating a pattern of small von Kármán vortices. The objective of this study is to conduct a case study analyzing the technical feasibility of the bladeless wind turbine at the Federal Institute of Bahia – Jequié Campus for clean energy generation. The methodology includes the research and evaluation of relevant databases, conducting and analyzing the altimetry of IFBA, performing and evaluating simulations using Ansys Fluent, and analyzing and identifying technical feasibility. The results include the campus altimetry and wind speed exceeding the minimum requirement for turbine operation, as evidenced by Ansys simulations revealing the release of vortices from these resonant masts. The selection of Vortex Tacoma was based on comparison with two other turbine models, standing out in terms of cost, maintenance, size, and power. Based on these simulations and the average data from the anemometer, the ideal arrangement for Vortex installation was identified. Furthermore, the use of multiple Vortex turbines in proximity increases energy gain due to the reduced space requirements and the vortex shedding wake effect. These preliminary results indicate the technical feasibility of the bladeless wind turbine at the Federal Institute of Bahia - Jequié Campus, offering a potential solution for clean energy generation in urban areas. Further analysis and the implementation of multiple units could significantly contribute to the energy sustainability of the institution and the surrounding region.

**Keywords:** Energy, Sustainability, Vortex.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>6</b>
1.1	Justificativa	7
1.2	Objetivo geral	7
1.3	Objetivo específico	7
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>8</b>
2.1	Ações do vento	8
2.2	Aerogerador	8
2.2.1	HAWT e VAWT	8
2.2.2	Vorticidade	9
2.3	Modelagem e estrutura	10
2.4	Vorticidade	13
2.5	Forças atuantes	13
2.5.1	Número de Reynolds	13
2.5.2	Número de Strouhal	14
2.5.3	Coefficiente de betz	14
2.6	Geração distribuída	15
2.7	Sistema	16
2.7.1	Off-grid	16
2.7.2	On-grid	16
2.8	Análise do ambiente	17
2.9	Software	18
2.9.1	Software Ansys	18
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>19</b>
3.1	Procedimento de estudo e pesquisa	19
3.2	Amostra de estudo	20
3.2.1	Critério de inclusão e exclusão	21
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E DISCUSSÃO</b>	<b>23</b>
4.1	Estudo de caso	24
4.1.1	Aerogeradores	25
4.1.2	Análise dos Aerogeradores	30
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>34</b>
5.1	Simulação	35

<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICE</b> . . . . .	<b>45</b>

# 1 Introdução

O desenvolvimento tecnológico, as questões voltadas à sustentabilidade e o impacto ambiental causado por fontes de energia não renováveis, são fatores que impulsionam a utilização de energia limpa no Brasil. O uso indiscriminado dos recursos geradores de energia elétricas tradicionais foram se tornando escassos e as consequências causadas por eles acarretam danos questionáveis que potencializam os impactos ambientais negativos, como o efeito estufa e diminuição dos combustíveis fósseis. Devido a isso, as energias renováveis ganharam força nos últimos anos, além de serem fontes inesgotáveis, ocasionam menos danos ao meio ambiente (ARAÚJO, 2023).

No Brasil, o emprego da geração eólica iniciou-se tardiamente. Apenas em 1992 foi instalada no arquipélago de Fernando de Noronha, em Pernambuco, a primeira turbina de grande porte em operação comercial da América do Sul. Sua estrutura contava com uma torre de 23m de altura, um gerador assíncrono de 75 kW, pás de 17m de diâmetro, geravam cerca de 10% de energia sustentável para Fernando de Noronha, economizando setenta mil litros de óleo diesel por ano que seriam destinados para geração de energia por combustão (ANEEL, 2015).

Segundo ABEEÓLICA (2023) em 2023, foram instalados 123 novos parques eólicos, num total de 4,8 GW de nova capacidade e 9,3 MW de capacidade potenciada. Foi um ano recorde de instalações de nova capacidade eólica. Vale lembrar que, em 2022, já havíamos batido um recorde com a instalação de 3,83 GW. E agora, em 2023, ultrapassamos a barreira de 4,8 GW de nova capacidade instalada, somando-se as potências em operação comercial e teste. O ano de 2023 terminou com 1027 usinas e 30,45 GW de potência eólica instalada, o que representou um crescimento de 18,79% em relação a dezembro de 2022, quando a capacidade instalada era de 25,63 GW.

O aerogerador sem pás é uma nova tecnologia que utiliza o fenômeno da vibração induzida por vórtices (VIV) para gerar energia eólica. Ao contrário dos aerogeradores convencionais (HAWT e VAWT), que possuem pás acopladas a seu eixo, esta estrutura consiste em uma base e uma haste de fixação. A geração de energia ocorre quando o vento cria pequenos vórtices ao redor da estrutura, fazendo-a oscilar e entrar em ressonância, capturando assim a energia do vento ao seu redor. Essa tecnologia é especialmente adequada para locais com ventos de baixa velocidade, como áreas urbanas, onde os aerogeradores tradicionais têm desempenho limitado, principalmente por conta do tamanho, acesso e fixação. O aerogerador sem pás pode ser uma opção viável para aumentar a geração de energia eólica em regiões urbanas, complementando a energia solar fotovoltaica e contribuindo para a geração distribuída.

Sendo assim, evidente que o assunto sobre energia eólica, em específico aerogerador sem pás, veem se tornando cada vez mais relevante. Nesse sentido, identificamos a necessidade

de pesquisar a viabilidade de um equipamento como esse para o Instituto Federal da Bahia - Campus Jequié. Assim, o presente estudo propõe a análise da viabilidade do aerogerador sem pás para o uso como fonte energética limpa, a fim de apoiar o ensino das técnicas relacionadas à geração de energia eólica.

## 1.1 Justificativa

A escolha de investigar a viabilidade técnica do aerogerador sem pás no Instituto Federal da Bahia - Campus Jequié, se fundamenta na necessidade de explorar alternativas inovadoras e sustentáveis para a geração de energia. Considerando o contexto atual de busca por fontes renováveis e economicamente viáveis, o estudo desse tipo de tecnologia se mostra pertinente. A possibilidade de reduzir custos, aumentar a eficiência e operar em locais com ventos mais brandos são aspectos que reforçam a importância dessa análise. Além disso, a preocupação com o impacto ambiental mínimo e a tendência crescente dessa tecnologia indicam a relevância de compreender suas potenciais aplicações e benefícios. Assim, este estudo se justifica pela sua contribuição para o avanço científico, tecnológico e sustentável, além de fornecer informações importantes para a tomada de decisões na implementação de soluções energéticas mais eficientes e ecologicamente responsáveis.

## 1.2 Objetivo geral

Realizar um estudo de caso analisando a viabilidade técnica para a instalação do aerogerador sem pás no Instituto Federal da Bahia - Campus Jequié.

## 1.3 Objetivo específico

- Apresentar as modelagens propostas na literatura para o sistema do aerogerador sem pás que utiliza a vorticidade para capturar energia do vento;
- Realizar e analisar a altimetria do Instituto Federal da Bahia - Campus Jequié, utilizando os softwares Google Earth e Topographic-map;
- Realizar simulação no software Ansys para análise do despendimento de vórtices;
- Analisar a viabilidade técnica de sistemas avaliados pela literatura, identificando a potência e eficiência do aerogerador sem pás e comparar a eficiência do sistema com outros modelos de aerogeradores.

## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Ações do vento

O vento é caracterizado pela movimentação de ar de diferentes temperaturas em grande escala. Essa movimentação não se torna um problema em construções baixas e pesadas, porém, como atualmente há uma tendência de edifícios cada vez mais altos e esbeltos, a ação do vento torna-se um dos principais fatores determinantes no momento da elaboração do projeto estrutural, pois provocam influências nas tensões, deformações, deslocamentos e vibrações (SILVA, 2024).

A ação dos ventos é o motivo de muitos danos causados nas estruturas, sobretudo em coberturas leves, estruturas de vedação, seja por efeitos estáticos ou dinâmicos. Com o estudo do fluxo do ar, é possível aprimorar as estruturas para fortalecê-las e confiáveis quando submetidas às pressões do vento, levando em consideração os conceitos imprescindíveis da dinâmica estrutura (REIS, 2019).

A ação do vento sobre uma estrutura é maior a medida que a altura da mesma aumenta. Logo, seu efeito é significativo em edifícios altos de múltiplos pavimentos. Portanto, o vento é um fenômeno natural instável, com variações aleatórias de velocidade em torno de um valor médio, as quais são conhecidas como rajadas, apresentando frequência e intensidade de curta duração e uma ocorrência sequencial (MARTINS, 2018).

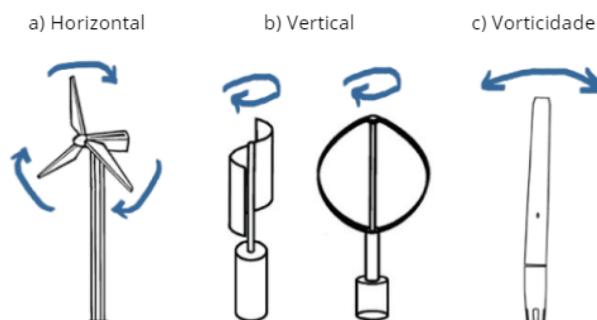
### 2.2 Aerogerador

Geradores eólicos, aerogeradores ou turbinas eólicas são equipamentos que transformam a energia cinética do vento em energia elétrica e, como geradores de eletricidade, são conectados a algum tipo de rede elétrica (MANWELL, 2009). Podem ser classificados em dois tipos, conforme a orientação do eixo de rotação, como aerogeradores de eixo horizontal (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine) ou aerogeradores de eixo vertical (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine), sendo os mais utilizados para geração em grande escala os de eixo horizontal (PINTO, 2014). Na figura 1, é viável examinar os tipos de turbinas eólicas encontrados no mercado, incluindo os aerogeradores de eixo horizontal e vertical - como os modelos Savonius e Darrieus - e o aerogerador Vortex, que aproveita a vorticidade para produzir energia.

#### 2.2.1 HAWT e VAWT

Segundo a PINTO (2014), os aerogeradores convencionais, tipo HAWT e VAWT, são constituídos por: pás, rotor, caixa de engrenagens, gerador elétrico, torre de suporte,

Figura 1 – Exemplos de modelos turbinas eólicas.



Fonte: (BLADELESS, 2018).

sistema de freios e sensor de direção como mostra a figura 2<sup>1</sup>. Os aerogeradores, ou turbinas eólicas, são compostos por pás que estão acopladas a um eixo central. A força do vento faz as lâminas girarem, o que faz o eixo do gerador se movimentar. Assim, a energia cinética do vento é transformada em energia mecânica. Em seguida, essa energia é convertida em eletricidade por um gerador conectado ao eixo do rotor, onde as lâminas estão instaladas. A energia elétrica gerada é então transportada por cabos que descem pela torre e se conectam a uma rede elétrica ou a um conjunto de baterias em sistemas independentes. Segundo a FIGUEIREDO (2020) o ponto de corte médio para o aerogerador de eixo horizontal é cerca de 4 m/s e para o aerogerador de eixo vertical é de cerca de 4,5 m/s. Para o aerogerador sem pás, espera-se que o ponto de corte seja menor do que dos aerogeradores de eixo horizontal e vertical e que a nova tecnologia possibilite gerar energia a partir de 3 m/s. Na tabela 1, são apresentados as potências de saídas para os exemplos comentados anteriormente.

Tabela 1 – Análise da potência de saída em diferentes velocidades.

Velocidade do vento (m/s)	HAWT pequeno	VAWT pequeno	Vortex Bladeless
3	0 W	0 W	3 W
6	72 W	44 W	35 W
7	104 W	66 W	60 W
8	135 W	86 W	80 W
9	160 W	105 W	93 W
Velocidade nominal	400 W	200 W	100 W

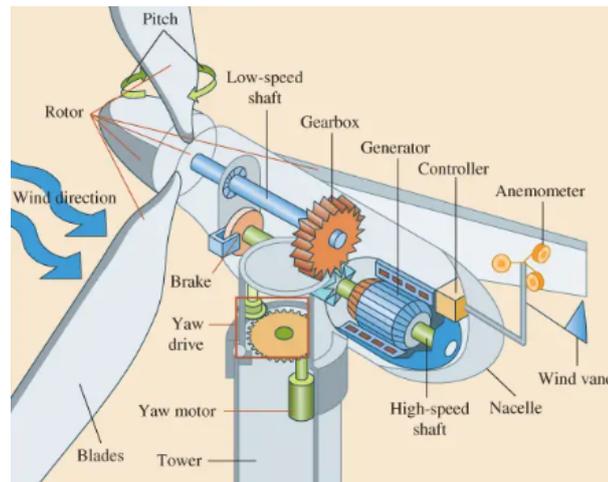
Fonte: (PINTO, 2014).

## 2.2.2 Vorticidade

O aerogerador por vorticidade, patenteado pela Vortex Bladeless, está em fase de estudos e com isso, ainda não é comercializado. Existem dois modelos patenteados, o Vortex

<sup>1</sup> (Blog da Engenharia). Fontes renováveis: parte 1 - energia eólica. Disponível em: <https://encurtador.com.br/BcjbG>.

Figura 2 – Partes da turbina eólica horizontal.



Fonte: Blog da engenharia (2018).

Nano ( $0.85m$ ) e o Vortex Tacoma( $2,75m$ ) como é demonstrado nas imagens 3 e 4 respectivamente. O sistema de sintonia alternador com magnético aeroelástico, além de transformar a energia mecânica em energia elétrica, mantém a sincronização com a frequência dos vórtices em diferentes faixas de vento, possibilitando a fabricação de pequenos dispositivos de aerogeradores por vorticidade. Este modelo não está completamente certificado e a fase atual é a produção de 100 unidades. Como informa, BLADELESS (2020) a fabricação é realizada manualmente e a produção das 24 peças é realizada pelo método de cadeia industrial, com moldes e enrolamentos de filamento, para uma maior confiabilidade nas propriedades estruturais das peças.

Figura 3 – Aerogerador por vorticidade.



Fonte: (BLADELESS, 2020).

## 2.3 Modelagem e estrutura

Segundo a NÚNEZ (2008) a modelagem de cilindro circular é a mais estudada no efeito de desprendimento de vórtices, mas os prismas de seção retangular, triangular e com outras formas de cantos vivos também estão sujeitos a excitações por desprendimento de vórtices mais fortes. Um modelo é uma simplificação da realidade, podem realizar planos

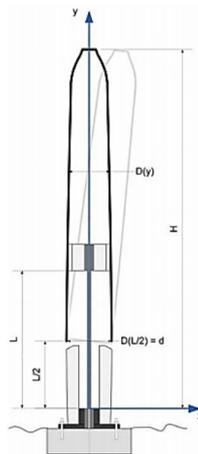
Figura 4 – Aerogerador por vorticidade.



Fonte: (BLADELESS, 2020).

detalhados, assim como planos mais gerais com uma visão panorâmica do sistema. Um bom modelo inclui detalhes e componentes de grande importância e omite os componentes menores que não necessitam de representação em determinado nível de abstração (CAMARINI, 2020). Ao realizar a modelagem, os diâmetros são intencionalmente dimensionados para serem maiores na parte superior, o que resulta em uma base mais estreita e uma haste mais espessa, como ilustrado na figura 5.

Figura 5 – Modelagem do aerogerador Vortex.



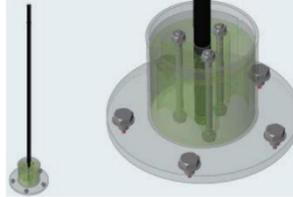
Fonte: (J., 2018).

A estrutura do aerogerador Vortex Bladeless constitui-se de três partes principais:

- Base: Possui o objetivo estrutural para absorver as forças aerodinâmicas e transmitir a dois componentes: o estator e a haste. A interação com o estator é baseada no efeito

do sistema de ajuste e com a haste, está fisicamente ligado pela junta parafusada (GONZÁLEZ, 2019), como é apresentado na figura 6.

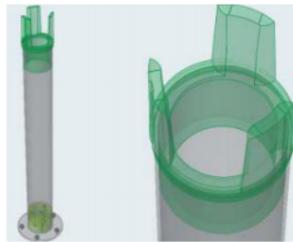
Figura 6 – Base do aerogerador Vortex.



Fonte: (GONZÁLEZ, 2019).

- Estator: Absorve as forças resultantes da interação entre o mastro e o sistema de ajuste, a localização do estator é entre a base e a haste (GONZÁLEZ, 2019) e está representada na figura 7;

Figura 7 – Localização do estator no dispositivo Vortex.



Fonte: (GONZÁLEZ, 2019).

- Haste: Absorve todas as forças resultantes para produzir o movimento oscilatório do dispositivo. O equilíbrio entre as forças resultantes do estator e as forças resultantes da haste é necessário para reduzir danos na haste por fadiga (GONZÁLEZ, 2019). Na figura 8, é apresentada a haste no equipamento.

Figura 8 – Haste do aerogerador Vortex.

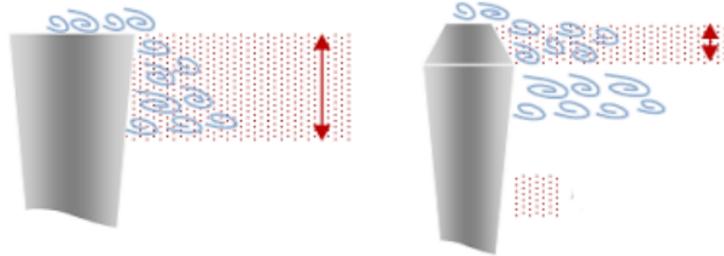


Fonte: (GONZÁLEZ, 2019).

Segundo HIDALGO Miguel Ángel Sánchez; PASCUAL (2017), o trabalho se concentra na parte superior da haste. Para atingir melhores resultados da eficiência do equipamento,

a parte superior da haste deve ser estreitada, possibilitando uma redução da turbulência gerada na ponta, que degrada a eficiência do equipamento. O efeito da turbulência na ponta da haste no aerogerador por vorticidade, é conhecido como “Efeito do Topo” e está representado na figura 9.

Figura 9 – Efeito do topo da haste ressonante.



Fonte: (HIDALGO MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ; PASCUAL, 2017).

## 2.4 Vorticidade

O vórtice é um fenômeno elástico que ocorre quando uma estrutura sólida é colocada em um fluido, neste caso o ar, formando uma sequência coordenada de vórtices de von Kármán. Este fenômeno consiste no desprendimento de vórtices com padrão oscilatório na região posterior do corpo por onde o fluido escoar ao redor. NÚNEZ (2008) afirma que para o fenômeno de desprendimento de vórtices ocorra de forma bem definida e coerente ao longo de toda a estrutura, é necessário que a modelagem da estrutura não seja aerodinâmica e possua contorno curvo ou poligonal e que tenha esbeltez considerável, sendo esbeltez a razão entre o comprimento da flambagem e o raio de giração. O índice de esbeltez é utilizado para estimar se o material sofre alteração na curvatura, avaliando o quanto a peça é vulnerável ao efeito da flambagem.

## 2.5 Forças atuantes

### 2.5.1 Número de Reynolds

De acordo a (FIGUEIREDO, 2020), o número de Reynolds consiste em um número adimensional utilizado na identificação do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície. Seu significado físico é o quociente entre as forças de inércia e de viscosidade do fluido, o que pode ser observado na equação 2.1:

$$R_e = \frac{V * d}{\nu} \quad (2.1)$$

Onde:

$R_e$  - Número de Reynolds;

$V$  - Velocidade crítica do vento;

$\nu$  - Viscosidade cinemática do fluido;

$d$  - Dimensão característica.

### 2.5.2 Número de Strouhal

Como diz (CAMARINI, 2020), o número de Strouhal é um parâmetro importante na análise de desprendimento de vórtices em corpos imersos em um escoamento. Esse número depende da forma da seção, da oscilação do cilindro, da rugosidade superficial da estrutura, do número de Reynolds e das características do escoamento. Tal parâmetro estabelece uma relação entre a frequência de desprendimento de um par de vórtices, o diâmetro do cilindro e a velocidade do vento. Essa relação pode ser observada na equação 2.2:

$$S_t = \frac{F_s * d}{V} \quad (2.2)$$

Onde:

$F_s$  - Frequência de desprendimento de vórtices;

$V$  - Diâmetro da estrutura;

$d$  - Velocidade crítica do vento.

De acordo com Blessmann (2005), há uma faixa de frequências na qual surgem contribuições aleatórias para as forças flutuantes. Porém, o número de Strouhal refere-se à frequência predominante.

### 2.5.3 Coeficiente de betz

Segundo (SCHUBEL, 2012), existe um limite físico, que independe do projeto, para quantificar a quantidade de energia que pode ser extraída. A extração de energia é realizada através do processo de redução da energia cinética do ar, e conseqüentemente da velocidade do vento. O aerogerador é incapaz de reduzir a velocidade do fluxo de ar até zero, visto que uma velocidade final nula implicaria a não existência de um fluxo. O físico alemão Albert Betz, afirmou que a turbina eólica tem um limite máximo de extração de energia, esse limite ficou conhecido como limite de Betz. Para calcular este limite, é necessária a potência disponível em uma área varrida pelo equipamento, sendo observada na equação 2.3.

$$P_{disp} = 0,5 * \rho * A * V^3 \quad (2.3)$$

Onde:

$\rho$  - Densidade do ar;

$A$  - Área varrida pelo equipamento;

$V$  - Velocidade do escoamento.

A equação da área varrida pelo equipamento pode ser observada na Equação 9:

$$reavarrida = readodispositivo + readeoscilao$$

De forma análoga chega-se ao coeficiente de empuxo ( $C_e$ , representado na equação 2.4).

$$C_e = \frac{P}{0,5 * \rho * V^2 * A} \quad (2.4)$$

O coeficiente de potência foi introduzido pela teoria de Betz. O limite de Betz indica que, mesmo para os melhores aproveitamentos eólicos recupera-se apenas um máximo de 59,3% da energia do vento, significando que o  $C_p$  máximo teórico é de 0,593. Contudo, em uma aplicação real este coeficiente é da ordem de 0,3 a 0,4 no máximo (FIGUEIREDO, 2020).

## 2.6 Geração distribuída

De acordo com ANEEL (2015) (Agência Nacional de Energia Elétrica), a micro e a mini geração distribuída consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Para efeitos de diferenciação, a micro geração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 quilowatts (kW), enquanto a mini geração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 megawatt (MW). A capacidade instalada de geração eólica em 2019, segundo o Relatório Síntese BEN 2020, foi de 10,4 MW na micro e mini geração distribuída. Estes sistemas podem ser dimensionados conforme a autonomia desejada, ou seja, podem funcionar em um sistema interligado à rede (on-grid) ou em um sistema autônomo (offgrid). Para a conexão de um aerogerador à rede, as regras são estabelecidas pela resolução normativa ANEEL n° 482/2012, modificada pelas resoluções Normativas ANEEL n° 687/215 e n° 786/2015, que permite o acesso a mini e micro geração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2015). O sistema de compensação de energia é válido para centrais geradoras que utilizem fontes de energias renováveis e que sejam conectadas a rede de distribuição por meio de uma unidade consumidora (COPEL). O sistema de compensação de energia elétrica permite que o excedente de energia gerado seja injetado na rede da distribuidora. Assim, se a

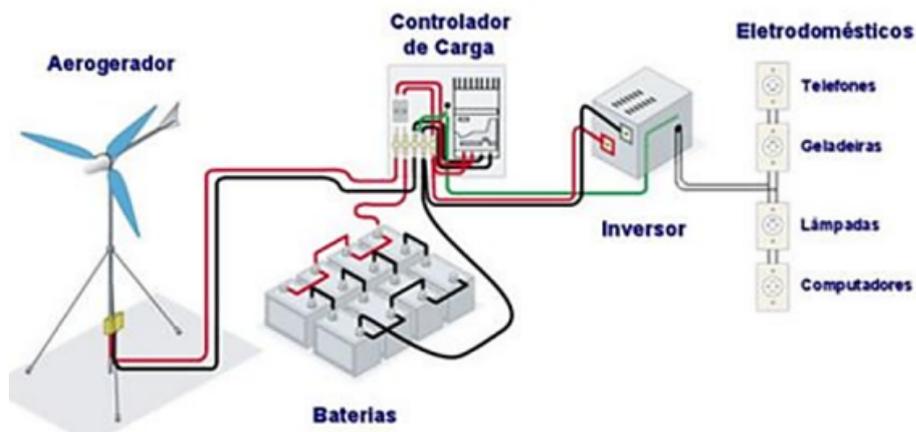
energia injetada na rede for maior que a consumida, o consumidor receberá créditos em energia que poderão ser abatidos em outra unidade consumidora ou nas próximas faturas. Os créditos têm uma validade de 60 meses (SCHUBEL, 2016).

## 2.7 Sistema

### 2.7.1 Off-grid

O sistema off-grid ou sistema isolado é um sistema autônomo que não está conectado com a rede. Esse sistema geralmente utiliza alguma forma de armazenamento de energia, como a bateria. Ainda, a energia gerada pode ser consumida diretamente, sem a necessidade de armazenamento. Os principais componentes utilizados para um sistema off-grid são a bateria, dispositivo de controle de carga e descarga e o inversor, que estão representados na figura 10 (MARQUES, 2008).

Figura 10 – Sistema isolado com geração eólica.

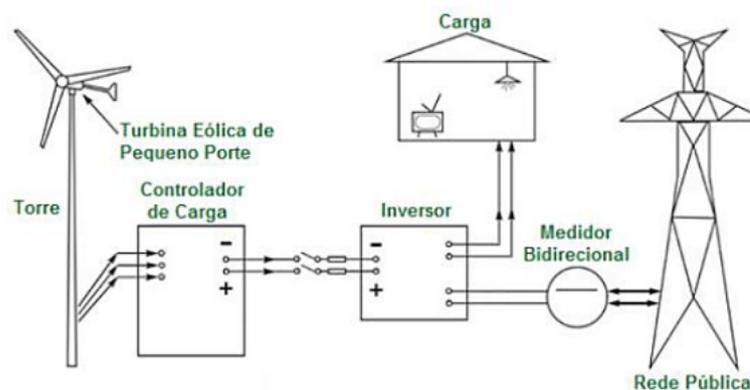


Fonte: (MARQUES, 2008)

### 2.7.2 On-grid

Para o sistema on-grid ou sistema interligado à rede, a geração é interligada diretamente à rede da concessionária local. Na figura 11 é apresentada a configuração do sistema conectado à rede. Este funcionamento permite que o excesso de energia elétrica produzida seja injetado na linha de transmissão, transformando-se em créditos para a residência, também conhecidos como sistema de compensação de energia elétrica (BOSO, 2015).

Figura 11 – Configuração de um sistema eólico conectado à rede.

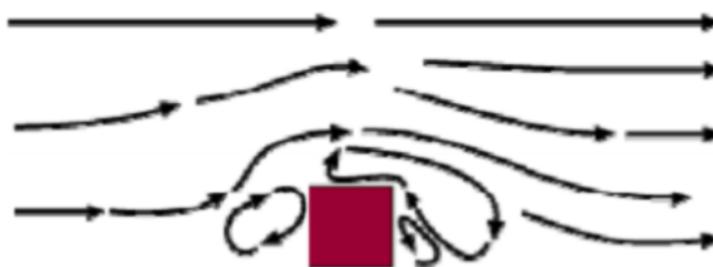


Fonte: (TAVARES, 2015)

## 2.8 Análise do ambiente

As informações para análise do ambiente para a instalação de aerogeradores são obtidas através de mapas topográficos. De acordo a Rui (2015) a análise consiste em verificar a existência de árvores, edifícios ou outros objetos mais altos que o equipamento em área próxima. Obstáculos como edifícios, árvores e formações rochosas, possuem uma influência significativa na diminuição da velocidade do vento e são fontes de turbulência na sua vizinhança. O escoamento é afetado na área envolvente do obstáculo, verificando-se que a zona turbulenta se pode estender até três vezes a altura do obstáculo, sendo mais intensa na parte posterior do obstáculo. Conforme demonstrada na figura 12.

Figura 12 – Escoamento na zona envolvente de um obstáculo.



Fonte: (RUI, 2015)

É indicado que o aerogerador seja instalado em um local onde o vento, seja forte e persistente. A identificação de um local de interesse referente à instalação pode ser identificada com visitas ao local e uso de mapas adequados. Estes procedimentos permitem realizar uma primeira estimativa do recurso eólico do local. Para a instalação de aerogeradores em prédios, devem ser analisados fatores como tamanho e capacidade de geração de energia (RUI, 2009).

## 2.9 Software

A utilização de softwares é fundamental para verificação do local de instalação e análise das condições de funcionamento.

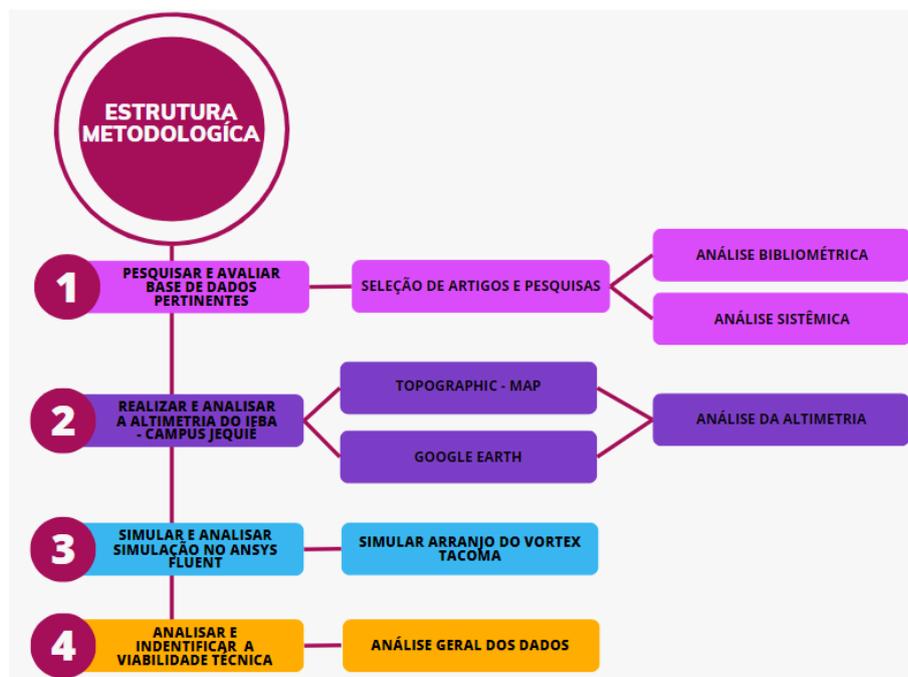
### 2.9.1 Software Ansys

O Ansys é um software desenvolvido para resolução de problemas por meio do método dos elementos finitos. Muito utilizado em diversas áreas da engenharia, para avaliação em modelos. De acordo a Rocha (2016) software apresenta alguns tipos de análise dentre eles estão: a análise estática que pode ser linear e não linear dos deslocamentos, deformações e tensões; a análise dinâmica, que verifica os efeitos de vibração, frequência, a variação das cargas com o tempo; análise térmica, verificação de variação de temperatura, quantidade de calor, fluxo térmico, etc.; análise eletromagnética a qual avalia os campos magnéticos em equipamentos eletromagnéticos; análise eletrostática que avalia os campos elétricos; e por fim a acústica, que realiza a avaliação da inteiração entre o meio fluido (som) e o meio sólido .

## 3 Metodologia

A abordagem metodológica empregada neste estudo possibilita, no primeiro momento, a identificação e análise de uma série de estudos relacionados ao tema "Avaliação da viabilidade técnica do aerogerador sem pás". No segundo momento, ocorre a realização e análise da coleta de dados relacionados ao campus por meio de um processo estruturado, conforme elucidado na figura 13. Este processo compreende diversas etapas, incluindo pesquisa em bases de dados pertinentes, realização da altimetria e análise do ambiente escolhido, além de simulação no software Ansys Fluent para explorar o desprendimento de vórtices e analisar a viabilidade técnica dos sistemas, juntamente com a comparação de eficiência dos mesmos.

Figura 13 – Fluxograma da estrutura metodológica.



Fonte: Autores (2024).

### 3.1 Procedimento de estudo e pesquisa

A pesquisa bibliográfica é vital para fundamentar projetos, oferecendo contexto e validação por meio da comparação de resultados. Ao explorar pesquisas passadas, foi construída uma base teórica, fortalecendo a credibilidade ao dialogar com o conhecimento existente, como diz Gil (2008) "As pesquisas exploratórias têm como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e idéias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores. Habitualmente

envolvem levantamento bibliográfico e documental, entrevistas não padronizadas e estudos de caso”.Ocorrendo o reflexo da conclusão com pesquisas anteriores, reforça a consistência e confere autenticidade às descobertas, consolidando-as como contribuições significativas.

## 3.2 Amostra de estudo

A seleção dos estudos se concentra em pesquisas bibliográficas realizadas em bases de dados específicas, Google Scholar, Periódicos da Capes e Science.gov, sendo na figura 14 é possível observar esse processo de coleta. Os trabalhos e artigos selecionados são de acesso aberto, garantindo uma leitura completa dos textos, todos os quais são considerados pertinentes para este projeto de pesquisa.

Figura 14 – Fluxograma da descrição da coleta de informações.

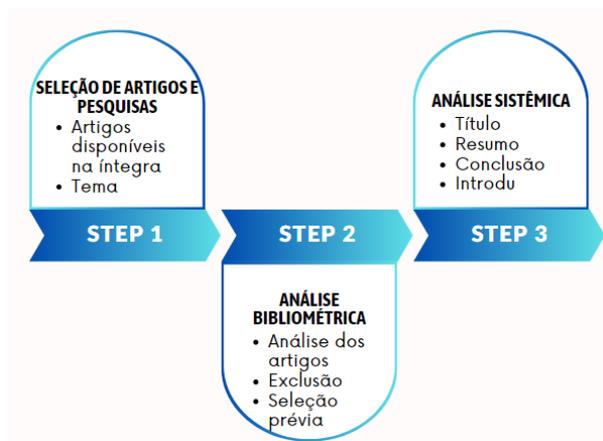


Fonte: O Autor (2024).

A partir da coleta de informações bibliográficas do assunto supracitado, foi definido o processo de análise desses dados, como mostra a figura 15. Inicialmente, procede-se à seleção de artigos e pesquisa, identificando os artigos disponíveis na íntegra e relacionados ao tema proposto. Em seguida, é realizada a análise bibliométrica dos artigos selecionados, envolvendo a análise dos mesmos, a exclusão dos que não são pertinentes e a seleção prévia daqueles que serão considerados para análise completa.

Posteriormente, inicia-se a análise sistemática, que abrange o título, resumo, conclusão, introdução e o artigo na íntegra dos artigos previamente selecionados. Durante esta etapa, os artigos que não estão alinhados com o tema do estudo são excluídos, garantindo que apenas os artigos relevantes sejam considerados para análise detalhada. Destaca-se ainda o uso do estudo de caso como método de pesquisa para aprofundar o conhecimento sobre um tema específico, como a análise técnica de um aerogerador sem pás.

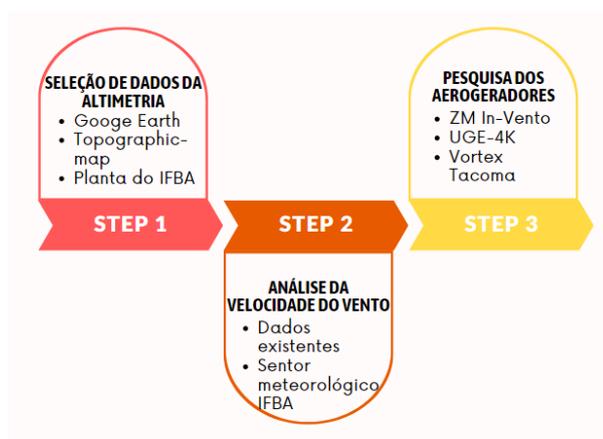
Figura 15 – Fluxograma da descrição da análise da coleta.



Fonte: O Autor (2024).

No contexto do estudo de caso realizado no IFBA - Campus Jequié, são empregados passos específicos para a coleta de informações. As etapas desse processo são descritas na figura 16, oferecendo uma visão abrangente sobre a condução do estudo de caso.

Figura 16 – Fluxograma da coleta de informações para o estudo de caso.



Fonte: O Autor (2024).

A amostra abrange a análise altimétrica do campus, utilizando dados geográficos e topográficos para identificar os locais mais apropriados para a instalação de aerogeradores. Além disso, é realizada uma avaliação da velocidade dos ventos em Jequié, com o intuito de verificar a viabilidade de operação dos equipamentos, como mostra na figura 17.

### 3.2.1 Critério de inclusão e exclusão

Em uma análise de viabilidade técnica de um aerogerador, diversas variáveis precisam ser examinadas, considerando várias opções construtivas, como diferentes alturas da torre, potência do aerogerador, locais de instalação e um longo período de monitoramento das velocidades do vento em diferentes áreas, utilizando anemômetros. No entanto, a proposta

Figura 17 – Fluxograma da análise de dados para o estudo de caso.



Fonte: O Autor (2024).

deste projeto de pesquisa está focada em um tipo específico de aerogerador, enquanto o estudo de caso aborda uma situação particular.

Os parâmetros de exclusão utilizados neste estudo de caso englobam vários aspectos-chave. Incluindo assim a terminologia empregada para a seleção dos artigos em diversas bases de dados, os tipos de modelos de aerogeradores considerados, com foco em dispositivos de pequeno porte com potência nominal de até 250 kW. Além disso, examinamos o princípio de funcionamento específico, sendo obrigatório que, para o aerogerador Vortex, utilize-se o conceito de vorticidade, bem como simulações por Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV) e o emprego do software CFD. Consideramos também o período de análise da velocidade dos ventos, requerendo um tempo mínimo estabelecido, e a localização precisa das medições dos ventos.

Para assegurar uma seleção mais delimitada de artigos, adotamos critérios de inclusão que abrangem diversos elementos. Isso compreende a abordagem de temas e assuntos pertinentes, a disponibilidade integral dos artigos e pesquisas online, assim como a utilização de palavras-chave pré-determinadas na filtragem. No contexto do estudo de caso, os critérios de inclusão se concentram no estabelecimento de um limite temporal para a realização da investigação e na disponibilidade de informações precisas sobre a velocidade dos ventos, coletadas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climático (CPTEC) a respeito da cidade de Jequié.

Além dos critérios já mencionados, é essencial considerar a altimetria do local, pois a elevação pode influenciar significativamente a eficiência do aerogerador. A localização específica do aerogerador é igualmente crucial, já que obstáculos como edifícios ou árvores podem obstruir o fluxo de vento e reduzir a performance do sistema. A velocidade média diária dos ventos em Jequié também é um parâmetro vital, uma vez que determina a quantidade de energia que pode ser gerada. Por fim, é imperativo avaliar se a estrutura selecionada é capaz de suportar o peso e as forças geradas pelo aerogerador, garantindo assim a segurança e durabilidade do sistema instalado.

## 4 Desenvolvimento e Discussão

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da coleta de informações bibliográficas, dos dados retirados do local (IFBA – CAMPUS JEQUIÉ-BA), além das médias feitas entres os geradores. A pesquisa foi realizada utilizando o Google Scholar , Portal de Periódicos CAPES/MEC e o Science.gov. A estratégia utilizada no Portal de Periódicos da Capes foi a busca avançada com as palavras-chave das temáticas necessárias somente no campo assunto com a expressão exata, utilizando os filtros “expandir meus resultados” e “periódicos revisados por pares”. No Google Scholar e Science.gov a estratégia utilizada foi a busca das palavras chaves como termos, utilizando filtros em relação a data de publicação. Optou-se pela pesquisa realizada para avaliação preliminar com termos em inglês, conforme apontado na tabela 2 e tabela 3.

Tabela 2 – Busca pelo material bibliográfico.

Palavras - chave	Portal de Periódicos CAPES/MEC	Google Scholar	Science.gov
Vortex	198.391	2.830.000	1104
Wind Turbine	61.430	1.450.000	819
Von Kármán	9.859	59.200	633
CFD	111.963	1.710.000	1056
VIV	28.421	443.000	1019

Fonte: O Autor (2024).

Os resultados obtidos na Tabela 4 foram excessivos, tornando a análise de todos os artigos e pesquisas muito extensa, mesmo utilizando a maneira representada na metodologia. Com isso, foi realizada uma nova busca de trabalhos científicos utilizando palavras-chave combinadas em inglês, representando os resultados obtidos na tabela 3.

Tabela 3 – Busca pelo material bibliográfico - Palavras combinadas em inglês.

Palavras - chave	Portal de Periódicos CAPES/MEC	Google Scholar	Science.gov
Vortex Von Kármán	1.157	30.200	178
Wind Turbine Vortex	2.150	82.300	579
Wind Turbine VIV	54	15.800	450
Wind Turbine CFD	3.352	131.000	559
Vortex CFD	6.937	3.790.000	614

Fonte: O Autor (2024).

Em certas palavras, os desfechos foram favoráveis com termos-chave específicos, indicando uma diminuição substancial no número de artigos e estudos selecionados. Contudo, em agrupamentos de palavras-chave como "Wind Turbine VIV", os resultados foram desfavoráveis, denotando uma baixa na quantidade de artigos identificados.

## 4.1 Estudo de caso

Para a coleta de dados referente ao estudo da topografia no IFBA - Campus Jequié, foram utilizadas plataformas como o Google Earth e o Topographic-map, softwares licenciadas que operam com uma extensa base de dados. A imagem do satélite representada na figura 18, obtida pelo aplicativo Google Earth, demonstra em tempo real o campus sede do Instituto Federal da Bahia, localizado em Jequié - BA, no bairro Curral Novo. Já a figura 19, delimitado pela linha em vermelho, apresenta o mapeamento de maneira topográfica que foi feito por satélite, delimitando também a localização do instituto.

Figura 18 – Imagem de satélite do IFBA - Campus Jequié - BA.



Fonte: Adaptado Google Earth (2023).

Figura 19 – Imagem da topografia do IFBA - Campus Jequié - BA.



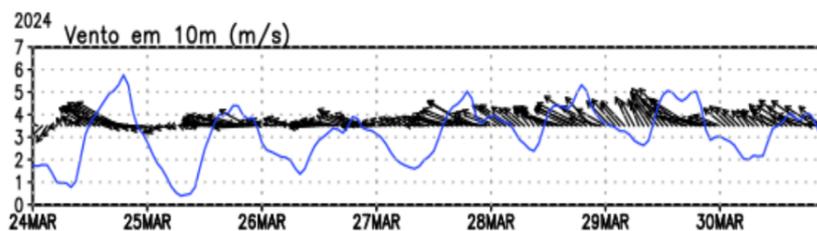
Fonte: Adaptado Topographic-map (2024).

Após a obtenção dos dados do Google Earth, são necessários dados topográficos de Jequié. Estas informações são obtidas através do próprio Google Earth e o Topographic-map, que é um site de pesquisa que alinha a base de dados do TessaDEM (Modelo de

elevação digital), assim resultando com uma variação vertical baixa<sup>1</sup>, tendo o objetivo de desenvolver, detalhar e monitorar o planeta Terra.<sup>2</sup>

Para a análise dos padrões de vento em Jequié, foram empregados dados provenientes do CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos), que é o centro mais avançado de previsão numérica de tempo e clima da América Latina, fornecendo previsões de tempo de curto e médio prazos e climáticas de alta precisão, desde o início de 1995, além de dominar técnicas de modelagem numérica altamente complexa, da atmosfera e dos oceanos, para prever condições futuras (CPTEC, 2021). A avaliação do potencial eólico de uma determinada região exige um processo metódico de coleta e análise de dados referentes à velocidade e ao comportamento dos ventos. Os dados foram obtidos ao longo de um período de um mês durante o ano de 2024, complementados por uma projeção para os meses subsequentes. Na figura 18 é demonstrado um exemplo de como foi fornecida as informações das variações dos ventos, para melhor entendimento dos resultados obtidos foi feito a tabela que se encontra no anexo, apresentando a variação da média mensal da velocidade dos ventos em Jequié-BA.

Figura 20 – Gráfico da velocidade média do vento em Jequié-BA entre os dias 24/03/2024 e 30/03/2024.



Fonte: CPTEC, 2024.

### 4.1.1 Aerogeradores

A eficácia da microturbina eólica é influenciada por variáveis como a velocidade do vento e a qualidade da própria turbina. Por essa razão, é importante avaliar a velocidade média do vento no local antes de instalar a turbina. Isso pode ser feito por meio de um anemômetro ou pela obtenção de dados da estação meteorológica mais próxima, a fim de prever o seu potencial de geração de energia.

Foram examinados três modelos de aerogeradores: o modelo horizontal ZM IN-Vento 3kW, o vertical UGE-4K e o de vorticidade Vortex Tacoma. O estudo foi conduzido no ambiente do IFBA - Campus Jequié, visando comparar e analisar qual desses tipos de aerogerador é mais adequado para a geração de energia elétrica na instituição.

A média das velocidades dos ventos encontradas pelo CPTEC, entre as datas 23/03/2024 a 23/05/2024 é de 3,4 m/s. O projeto de pesquisa, Vortex, estabeleceu um limite máximo

<sup>1</sup> Precisão vertical : 2 metros ou mais para 58% dos dados . - <https://tessadem.com/>

<sup>2</sup> Google Earth (2023): <https://www.google.com.br/earth/>

de velocidade do vento para a geração de energia elétrica entre 11 m/s e 12 m/s. Portanto, os aerogeradores examinados devem estar em conformidade com essa faixa de velocidade do vento para uma análise mais precisa.

A comparação entre tecnologias envolve a análise de dados provenientes de artigos científicos, pesquisas e estudos sobre os equipamentos disponíveis no mercado. Levando em conta que a eficiência máxima de Betz é de 59,3%, nenhum dos modelos de aerogeradores terá uma eficiência superior a esse valor.

De acordo Topographic-Map (2015) o aerogerador In-Vento com eixo horizontal, possui valores de potência nominal de 3 kW, torre com uma altura de 12 metros e o rotor com diâmetro de 3,4 metros e possui uma faixa de operação, para que as pás não saiam do controle, considerado um limite máximo de sobrevivência. As características deste modelo, representado na figura 21 são três pás de design aerodinâmico, para melhor aproveitamento do vento e um leme direcional, também conhecido como cauda, que posiciona o aerogerador na direção em que o vento se encontra. O aerogerador é do tipo síncrono de ímã permanente, desenvolvido para geração de energia de rotação variada.

Figura 21 – Turbina eólica ZM In-Vento.



Fonte: (TOPOGRAPHIC-MAP, 2015)

Assim sendo o aerogerador foi projetado para fornecer energia em lugares abertos e também no topo de prédios. As características técnicas estão representadas na tabela 4.

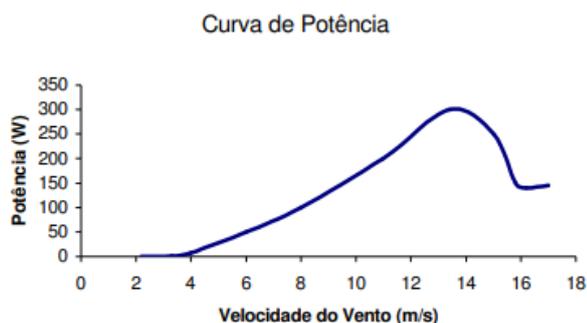
Tabela 4 – Especificação técnica do aerogerador ZM In-Vento.

Modelo	ZM In-Vento 3kW
Gerador	Trifásico de ímãs-permanentes;
Massa do aerogerador (sem a torre)	125,15 kg
Massa da Torre	510,73 kg
Potência Nominal	3000 W
Produção energética anual (Vento médio 6 m/s)	6252 kWh
Velocidade de vento para o início de geração	3 m/s
Velocidade de vento a potência nominal	12,5 m/s
Velocidade de vento de sobrevivência	52,5 m/s
Diâmetro do rotor	3,4 m
Número de pás	3
Material das pás	Fibra de vidro reforçada

Fonte: (TOPOGRAPHIC-MAP, 2015).

A curva de potência de um aerogerador é o diagrama que relaciona a potência produzida com a velocidade do vento. Esse diagrama ilustra a faixa de operação em termos de velocidade, desde a velocidade mínima de partida até a velocidade máxima de operação. A curva de potência do aerogerador UGE-4K fornecida pelo fabricante é mostrada na figura 22

Figura 22 – Curva de potência obtida através de dados do fabricante.



Fonte: (BLADELESS, 2018)

Adaptado de Eduard (1988) visando prevenir possíveis danos ao aerogerador, o sistema conta com o método de proteção conhecido como autofurling, consiste em girar passivamente o eixo do rotor para fora do vento e é um meio comum e eficaz de limitar a força sobre uma pequena turbina eólica em ventos fortes, como velocidades superiores a 12,5 m/s, nessas velocidades, o sistema pode gerar ruídos intensos e há o risco de danos às pás ou aos componentes elétricos. Quando o vento volta a velocidades normais para o funcionamento, o aerogerador automaticamente retorna à sua posição de trabalho.

Para o Tales (2011) o UGE-4K (Figura 23) tem a sua potência nominal de 4 kW e possui velocidade nominal de 12 m/s como mostra a tabela 5<sup>3</sup>. É uma turbina eólica de eixo vertical (TEEV), possui baixo ruído e capacidade de captação de vento em todas as direções, ideal para instalações em zonas urbanas.

Figura 23 – Aerogerador UGE-4K.



Fonte: Lawrence (2016).

O aerogerador de eixo vertical, modelo UGE-4K<sup>4</sup>, está equipado com controle de passo. Esse sistema, conhecido como Pitch Control, é um mecanismo ativo que geralmente requer

<sup>3</sup> Manual Wind Turbine (UGE-4K) - <https://encurtador.com.br/jiTIz>

<sup>4</sup> Image UGE-4K : <https://encurtador.com.br/bWUH4>

Tabela 5 – Especificação técnica aerogerador UGE-4kw..

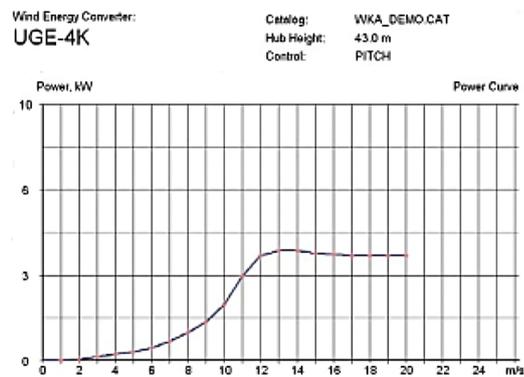
Eixo	Vertical
Altura	4,60 m
Largura	3,00 m
Peso	461 kg
Área Varrida	13,0 m <sup>2</sup>
Materiais da lâmina	Fibra de carbono e fibra de vidro
Potência nominal	4 kw
Velocidade nominal	12 m/s

Fonte: Manual UGE-4k.

um sinal de controle do gerador de potência. Quando a potência nominal do gerador é excedida devido ao aumento da velocidade do vento, as lâminas ajustam seu ângulo de passo para diminuir o ângulo de ataque do fluxo de ar. Essa diminuição no ângulo de ataque modifica as forças atuantes, resultando em uma redução da extração de potência do vento pela turbina.

A curva de potência de um aerogerador é o diagrama que relaciona a potência produzida com a velocidade do vento. Esse diagrama ilustra a faixa de operação em termos de velocidade, desde a velocidade mínima de partida até a velocidade máxima de operação. A curva de potência do aerogerador UGE-4K fornecida pelo fabricante é mostrada na figura 24<sup>5</sup>.

Figura 24 – Curva de potência aerogerador UGE-4K.



Fonte: Urban Green Energy (2018).

O aerogerador por vorticidade escolhido para análise no estudo de caso é o Vortex Tacoma, com haste de 2,75 metros, potência nominal de 1 kW e velocidade de partida de 3 m/s. O equipamento é fabricado pela Vortex Bladeless, uma empresa espanhola e com isso o equipamento deve ser importado. Na figura 25 está representado o aerogerador.

<sup>5</sup> Site Urban Green Energy : <https://pt.wind-turbine.com/usinas-eolicas/104398/urban-green-energy-uge-4k.html>

Figura 25 – Aeroogerador Vortex Tacoma.



Fonte: (BLADELESS, 2018)

O aerogerador Vortex Tacoma é indicado para instalação em áreas urbanas, pela baixa velocidade dos ventos necessária para o funcionamento do equipamento. As especificações técnicas do aerogerador Tacoma estão representadas na tabela 6.

Tabela 6 – Especificação técnica aerogerador Vortex Tacoma.

Potência nominal	1 kW
Velocidade inicial	3 m/s
Velocidade nominal	12 m/s
Altura total	2,75 m
Peso	14kg
Diâmetro máximo	0,261 m
Máxima velocidade tolerada	35 m/s
Área varrida máxima	0,97 m <sup>2</sup>
Máximo ângulo de amplitude	2,7 °

Fonte: (GONZÁLEZ, 2019)

Para realizar a curva de potência do aerogerador Tacoma é necessário calcular o Coeficiente de Potência para diferentes velocidades, para isso é utilizada a Equação 2.4 e os resultados estão apresentados na tabela 7.

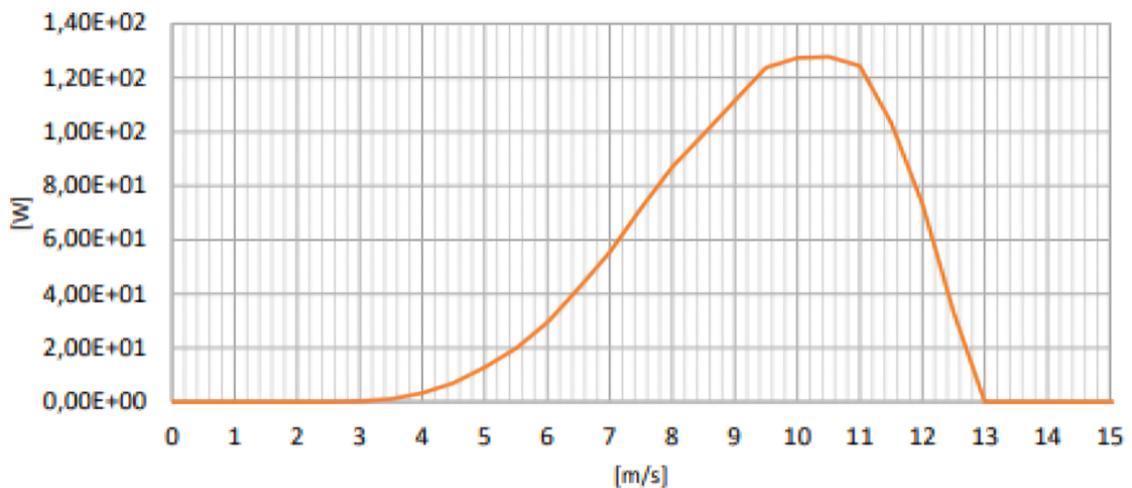
Tabela 7 – Análise do coeficiente de potência em relação à velocidade do vento.

Velocidade do vento (m/s)	Coeficiente de potência
3	0,0125
4	0,075
5	0,15
6	0,2
7	0,2375
8	0,25
9	0,225
10	0,1875
11	0,1375
12	0,0625
13	0

Fonte: (GONZÁLEZ, 2019)

Após a realização do cálculo do coeficiente de potência em relação a diferentes velocidades dos ventos, é realizada a curva de potência do aerogerador Vortex Tacoma, apresentada na figura 26.

Figura 26 – Curva de potência do aerogerador Vortex Tacoma.



Fonte: (GONZÁLEZ, 2019)

#### 4.1.2 Análise dos Aerogeradores

Cada variante de aerogerador possui características distintas, o que influencia diretamente em sua aplicação e viabilidade. Os aerogeradores de eixo vertical e horizontal são comumente posicionados em áreas afastadas dos centros urbanos, devido à necessidade de ventos mais intensos e ao porte dos equipamentos, os quais demandam espaços amplos para instalação e disposição. A análise comparativa dos diferentes tipos de aerogeradores abordados neste estudo, em relação a fatores específicos, está detalhada na tabela 8,

onde são contrastados os aerogeradores baseados em vorticidade Vortex, de eixo vertical Darrieus e de eixo horizontal.

Tabela 8 – Comparação entre aerogeradores por vorticidade, eixo vertical e eixo horizontal

Fatores	Vortex	Eixo Vertical	Eixo Horizontal
Perfil da pá	-	Complicado	Complicado
Mecanismo de direção	Não	Não	Sim
Possibilidade de mecanismo de passo	Sim	Não	Sim
Torre	Sim	Não	Sim
Cabos de sustentação	Opcionais	Sim	Não
Ruído	Baixo	Moderado	Alto
Área da pá	-	Grande	Pequena
Carga da pá	-	Baixa	Alta
Auto inicialização	Não	Não	Sim
Fundação	Não	Simples	Extensa
Estrutura global	Simples	Simples	Complicada

Fonte: (FIGUEIREDO, 2020)

As turbinas de eixo horizontal (HAWT) requerem ajustes de orientação para alinhamento com a direção do vento, o que demanda tempo e, por vezes, consumo adicional de energia. Sua capacidade de adaptação às variações do vento é considerada mais lenta em comparação com as turbinas Vortex e as turbinas de eixo vertical (VAWT), que dispensam mecanismos de direcionamento.

Os aerogeradores baseados em vorticidade possuem um design completamente circular e mantêm uma orientação constante em relação ao vento. Isso é particularmente relevante em ambientes urbanos com condições de vento turbulentas. Além disso, esses aerogeradores têm a capacidade de iniciar e parar de forma autônoma, sem intervenção humana.

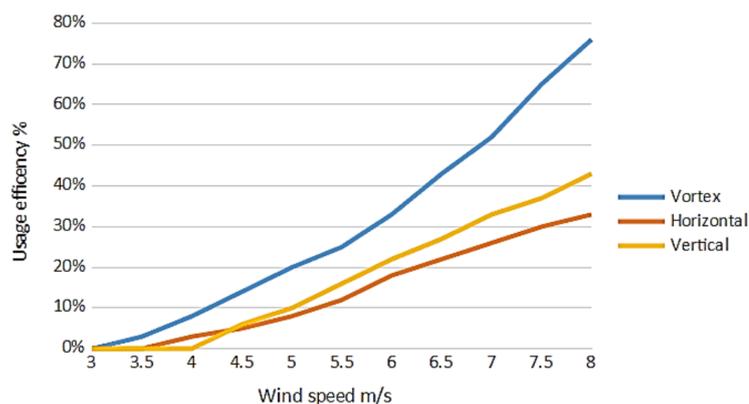
Em relação aos sistemas de sustentação, o uso de cabos no aerogerador Vortex é opcional, ao passo que é obrigatório na turbina de eixo vertical. O tubo do aerogerador é suportado por cabos de aço e mancais para mantê-lo na posição vertical. Esses cabos são conectados à parte superior do tubo, estendendo-se até o solo, onde são fixados por meio de conexões de aço a uma fundação.

As estruturas das diferentes tipologias de aerogeradores variam significativamente. O aerogerador horizontal é composto por pás, eixo e gerador posicionados no topo da estrutura. Por outro lado, o aerogerador de eixo vertical apresenta as mesmas partes mecânicas, porém situadas mais próximas ao solo. Já o aerogerador por vorticidade conta com uma base, estator e haste também localizados próximo ao solo.

Considerando essa disposição das partes mecânicas dos aerogeradores, aqueles com componentes mais próximos ao solo tendem a exigir menores despesas com manutenção. Isso se deve ao fato de que a substituição e manutenção de peças podem ser realizadas sem a necessidade de grandes equipamentos de segurança.

De acordo a BLADELESS (2018) quando as turbinas são capazes de trabalhar com eficiência em velocidades de vento menores, o tempo de operação tende a aumentar. Visando comparar a eficiência de cada tecnologia para as faixas de velocidade do vento mais comuns em áreas urbanas, a figura 27 representa a estimativa da produção útil de cada tipologia de turbinas dividida por sua produção nominal fornecida.

Figura 27 – Curva de potência dos aerogeradores.



Fonte: (GONZÁLEZ, 2019)

De acordo a BLADELESS (2018) de utilização de cada tecnologia não é diretamente proporcional à sua potência nominal, normalmente as turbinas que atingem uma maior potência nominal costumam apresentar uma pior curva de eficiência. Dessa forma, se uma turbina pode alcançar uma saída de potência máxima mais alta, ela terá um desempenho pior com ventos fracos.

A comparação entre o aerogerador Vortex e os modelos de eixo horizontal e vertical revela a superioridade da tecnologia por vorticidade em termos de eficiência a depender de sua aplicação. Essa vantagem deriva do fato de que o Vortex foi projetado para capturar energia ao nível do solo, onde as velocidades dos ventos variam normalmente entre 3 m/s e 8 m/s. Já as tecnologias de eixo horizontal e vertical foram fabricadas para operar em altitudes mais elevadas, onde as velocidades dos ventos são geralmente mais altas.

Ressalta-se, no entanto, que as turbinas Vortex Bladeless interrompem sua operação em velocidades do vento acima de aproximadamente 12 m/s, enquanto as turbinas eólicas convencionais permanecem em atividade sob tais condições. Diante disso, em locais com velocidades de vento mais elevadas, turbinas de eixo horizontal ou vertical podem apresentar um potencial de aproveitamento energético superior.

A instalação do aerogerador Vortex no ambiente não representa uma ameaça para as aves, devido à sua estrutura compacta e à ausência de pás, as quais ocupam vastas áreas onde as aves habitualmente vivem. A fabricação desse equipamento é realizada utilizando fibras de vidro e carbono, resultando em um processo de construção e desenvolvimento de baixo consumo energético, com produção rápida e direta, o que acarreta um impacto mínimo.

O aerogerador por vorticidade apresenta uma estrutura compacta e dispensa o uso de pás, ocupando assim uma área menor para geração de energia. Seu arranjo permite a instalação de mais aerogeradores no mesmo espaço em comparação aos modelos de eixo vertical e horizontal. Além disso, a velocidade dos ventos necessária para alcançar a potência nominal do equipamento tende a ser menor no aerogerador por vorticidade, viabilizando a geração de energia com velocidades de vento consideradas comuns em ambientes urbanos.

O aerogerador Vortex Tacoma ainda não é comercializado e com isso é difícil realizar uma análise detalhada dos custos de fabricação e manutenção, pois não há experiência anterior com manutenção do aerogerador sem pás ou no impacto da produção em massa no custo. Ainda, os custos estão sujeitos a variação dependendo do modo de instalação, se é isolado, em conjunto ou com painéis fotovoltaicos (FIGUEIREDO, 2020).

De acordo com GONZÁLEZ (2019), as partes constituintes referentes a custos de fabricação são: mastro, haste flexível, torre, suporte, oscilador, conversor AC/DC, estator e base. O custo da matéria-prima corresponde a aproximadamente 120£(Libras) e o custo estimado com produção em série do equipamento é de aproximadamente 360£(Libras).

A vantagem significativa do aerogerador Vortex reside em seu baixo custo de operação e manutenção. O dimensionamento do equipamento é projetado de maneira a garantir que a fadiga dos materiais seja um fator limitante para sua vida útil. A manutenção deve se concentrar nos componentes expostos às condições climáticas adversas e na eletrônica. Na tabela 9, são apresentados os custos do equipamento, os custos totais, a produção estimada de energia anual e o tempo de funcionamento previsto do aerogerador Vortex Tacoma.

Tabela 9 – Custos e produção de energia anual estimada do aerogerador Vortex Tacoma

<b>Parâmetro</b>	<b>Aerogerador Vortex Tacoma</b>
Custo do equipamento	360 £
Custos totais	0,92 £
Produção estimada de energia por ano	350 kWh
Tempo de funcionamento	20 anos

Adaptado de (GONZÁLEZ, 2019)

## 5 Resultados

O resultado da análise é apresentado na figura 28, a altimetria do IFBA - Campus Jequié a partir dos dados gerados pelo Google Earth e do Topographic-map.

Figura 28 – Imagem do Instituto Federal da Bahia - Campus Jequié.



Fonte: O Autor (2024).

A altimetria é a medição de altitudes utilizando a representação dos resultados em planta topográfica. Os números de 1 a 8 representadas na tabela 10, demonstram as localidades do IFBA.

Tabela 10 – Altimetria do IFBA - Campus Jequié .

Número	Local	Altimetria (m)
1	Guarita	224
2	Bloco B	225
3	Bloco A	225
4	Praça de alimentação	225
5	SRA (Bloco A)	225
6	Bloco C	229
7	Bloco D	225
8	Ginásio Poliesportivo	227

Fonte: O Autor (2024).

A escolha do local de instalação desempenha um papel crucial na avaliação da geração de energia. As variações nas velocidades do vento podem ser explicadas por diversos elementos, como a elevação, a topografia e as construções circundantes, que podem influ-

enciar a direção do vento. Ao analisar os dados apresentados na tabela 10, observa-se que o ponto mais elevado no IFBA - Campus Jequié é o bloco c, identificado como ponto 6, seguido pelo ginásio poliesportivo, identificado como ponto 8. Portanto, o local de instalação, dos dois pontos mais elevados no IFBA onde a velocidade do vento é maior, o bloco c se torna mais relevante pela formação da estrutura do prédio.

A tabela 11 fornece uma comparação entre os aerogeradores de eixo horizontal, vertical e por vorticidade selecionados para o estudo de caso, incluindo os dados técnicos dos aerogeradores In-Vento, UGE - 4K e Vortex Tacoma, analisando aspectos como potência nominal, diâmetro do rotor, altura da torre e velocidade inicial.

Tabela 11 – Dados técnicos dos aerogeradores.

Modelo	Potência (kW)	Diâmetro do rotor (m)	Altura da torre (m)	Velocidade inicial (m/s)	Velocidade nominal (m/s)
IN - VENTO	3	3,4	12	3	12,5
UGE - 4K	4	4,2	4,6	3	12
VORTEX TACOMA	1	0,261	2,75	3	12

Fonte: Adaptado (FIGUEIREDO, 2020)

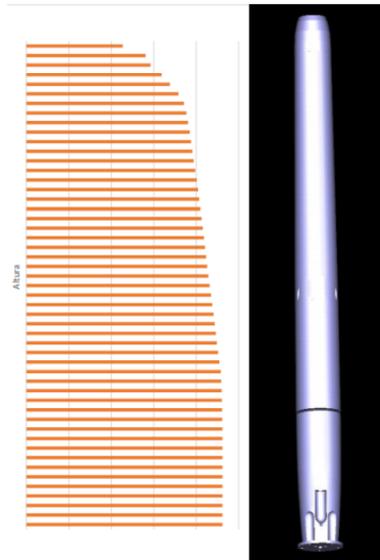
Ao analisar os dados da tabela 11, é evidente que o aerogerador Vortex Tacoma apresenta valores menores em comparação com os modelos In-Vento e UGE4K, tanto em termos de potência (kW), diâmetro do rotor (m) quanto altura da torre (m). No entanto, todos os modelos requerem uma velocidade mínima de partida de 3 m/s. Portanto, em ambientes onde o espaço para a instalação de um aerogerador com torre alta e rotor de maior diâmetro é limitado, o Vortex Tacoma se apresenta como a escolha indicada.

## 5.1 Simulação

É viável examinar diversas configurações alterando a altura da haste vibratória, o contorno da haste com mudanças no ápice e a capacidade nominal do aerogerador. Na figura 29, é ilustrado o esboço do aerogerador conforme a vorticidade, associando a altura do aparelho e o desenho do produto.

No ponto mais alto da haste é visível que o formato se estreita, isso é feito para permitir uma diminuição da turbulência na extremidade, a qual diminui a eficácia do dispositivo. O impacto da turbulência na extremidade da haste no aerogerador conforme a vorticidade é denominado como "Efeito do Topo" por conta do arredondamento na extremidade.

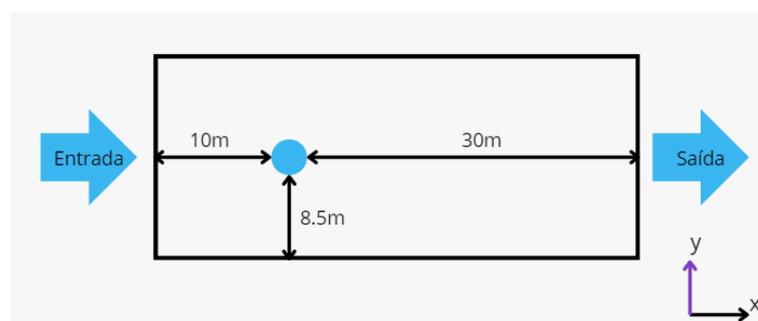
Figura 29 – Perfil genérico do aerogerador vortex tacoma.



Fonte: (GONZÁLEZ, 2019)

Após a elaboração do modelo, empregou-se o programa Ansys Fluent para a avaliação da simulação numérica do fluxo de fluidos (Desprendimento), o que desempenha uma função essencial para a compreensão e a medição do fenômeno. Assim, na figura 30, é exibido o início da simulação onde é feita uma esquematização do domínio geométrico. Este domínio consiste em um retângulo de 40 metros de comprimento e 17 metros de altura, com uma haste circular de 0,261 metros de diâmetro posicionada a 10 metros da entrada do fluxo e a 8,5 metros das bordas superior e inferior do domínio, com a escolha destas medições para o domínio geométrico pode-se apresentar melhor o fenômeno demonstrado. A entrada e saída do fluxo são indicadas conforme mostrados na figura.

Figura 30 – Domínio Geométrico.

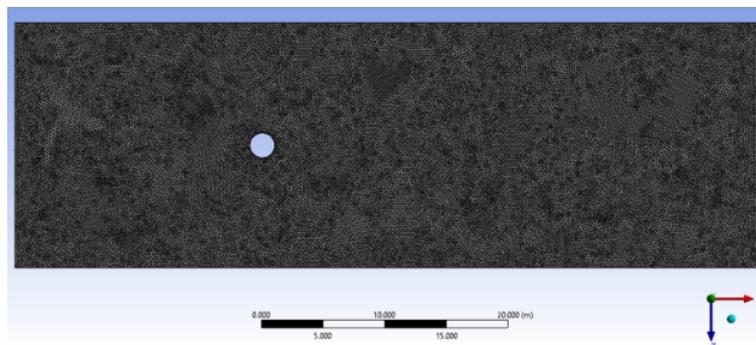


Fonte: O Autor (2024).

A figura 31, é exibida a malha gerada para a simulação. O domínio geométrico é discretizado com uma malha suficientemente refinada, especialmente ao redor da haste circular, para capturar com precisão os detalhes do desprendimento de vórtices. A malha apresentada está garante uma boa resolução espacial, para a obtenção dos resultados. Após a geração da malha, foi configurada a entrada de velocidade do fluxo, variando até 13 m/s,

ultrapassando a média do limite nominal dos aerogeradores para expressar este limite de forma detalhada.

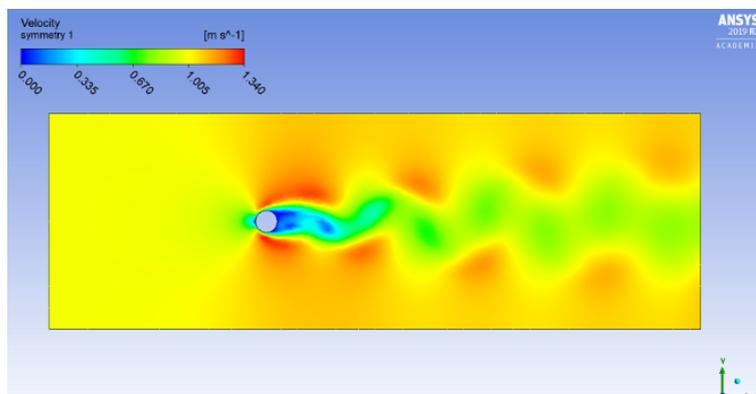
Figura 31 – Malha estruturada.



Fonte: O Autor (2024).

Por meio da simulação é possível observar (figura 32) a formação de vórtices em uma haste circular, representando a configuração do aerogerador por vorticidade com um número de Reynolds entre 80 e 300. As perturbações que surgem após a estrutura são variações nas forças na direção lateral do fluxo, devido à alteração da pressão dinâmica, o que resulta em cargas dinâmicas e na oscilação da haste vibratória.

Figura 32 – Resultado de simulação no software Ansys Fluent.

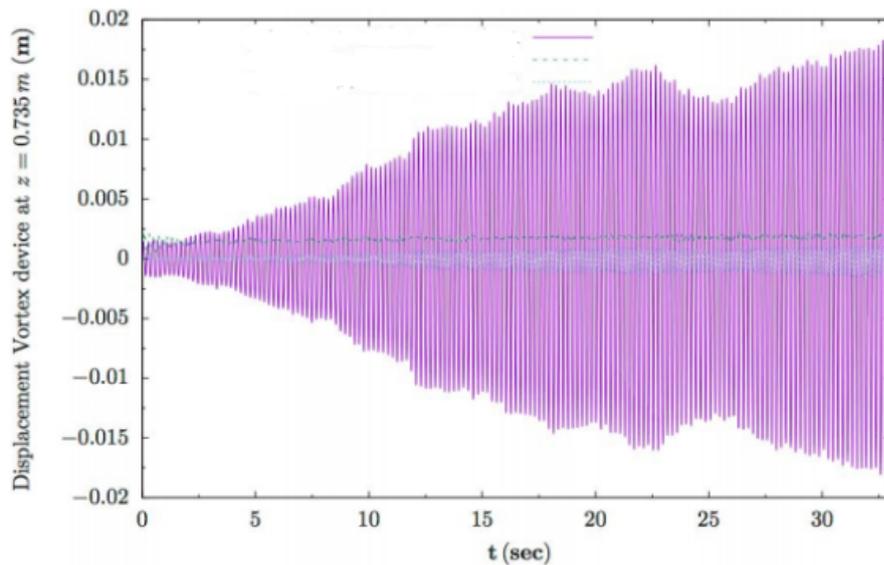


Fonte: O Autor (2024).

Por meio da simulação é possível observar a formação de vórtices em uma haste circular, representando a configuração do aerogerador por vorticidade com um número de Reynolds entre 80 e 300. As perturbações que surgem após a estrutura são variações nas forças na direção lateral do fluxo, devido à alteração da pressão dinâmica, o que resulta em cargas dinâmicas e na oscilação da haste vibratória. O desprendimento intermitente de vórtices é um fenômeno causado pelo movimento do fluido no equipamento, provocando instabilidades no fluxo na região após o cilindro. A interação entre fluido e estrutura envolve a combinação de princípios de diferentes áreas, especialmente da fluidodinâmica e da mecânica estrutural. Esse acoplamento considera o campo de pressão ou temperatura de

uma análise CFD e os impactos diretos dessas cargas na análise estrutural. deslocamento das oscilações é impactado pelas diversas frequências do processo oscilatório, conhecido como efeito lock-in, resultante das Vibrações Induzidas por Vórtices (VIV). Este fenômeno amplifica o coeficiente de arrasto devido à criação de forças no fluxo. As VIVs são determinantes na vida útil por fadiga da estrutura, afetando a frequência natural da estrutura, que se aproxima da frequência das cargas geradas pela corrente. O deslocamento máximo ocorre durante a oscilação da haste ressonante.

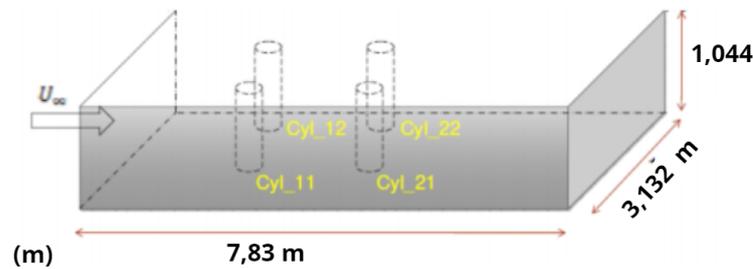
Figura 33 – Deslocamento na oscilação do Vortex.



Fonte: (CAJASA, 2016).

De acordo a (FIGUEIREDO, 2020) a haste ressonante analisada na figura 33 possui 0,735 metros de altura e o período da simulação foi de 34 segundos. Ao decorrer da oscilação da haste ocorre a amplificação do movimento com 0,02 metro para cada lado e frequência registrada de 4,8 Hz. Durante a oscilação da haste verifica-se que o equipamento está extraindo energia do fluido e demonstrando o efeito lock-in bem capturado na simulação fluido-estrutura. Os vórtices interagem com a estrutura, gerando campos de pressão oscilantes. Essas forças podem induzir oscilações no corpo, excitando diferentes modos naturais, podendo resultar em fadiga e colapso estrutural. O arranjo dos aerogeradores Vortex deve ser cuidadosamente selecionado para maximizar a extração de energia do fluido, garantindo a integridade da estrutura. O posicionamento pode variar, com foco em intensificar a turbulência do fluxo para aumentar a conversão de energia eólica em elétrica. A disposição adequada é ilustrada na figura 34 para a instalação do aerogerador.

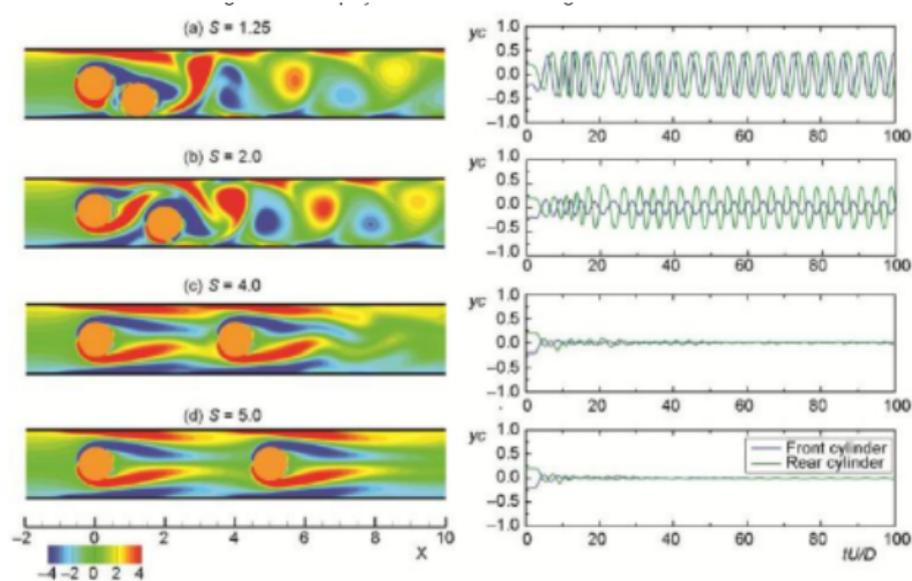
Figura 34 – Arranjo para instalação do aerogerador Vortex.



Fonte: (GONZÁLEZ, 2019)

Para o determinado diâmetro máximo da estrutura do Vortex Tacoma, que possui um valor de 0,261 metros, investigamos o intervalo entre as turbinas eólicas. O objetivo foi detectar o desprendimento dos redemoinhos entre os cilindros 11, 12, 21 e 22 durante uma simulação, figura 35.

Figura 35 – Espaçamento entre os aerogeradores Vortex.



Fonte: (GONZÁLEZ, 2019)

A análise do espaçamento foi conduzida por meio de simulação, utilizando um número de Reynolds de 100 para representar o regime de formação de redemoinhos. Na simulação (a), identificamos que a configuração que permite a maior amplitude é alcançada com uma taxa de separação de 1,25, correspondendo a uma distância entre os Vortex Tacoma de 0,29 metros. Assim sendo, a exploração do terreno revela-se como um fator vantajoso para a instalação dos aerogeradores Vortex Tacoma, devido à possibilidade de instalar uma quantidade significativa de equipamentos próximos, impulsionada pelo efeito da esteira de desprendimento de redemoinhos.

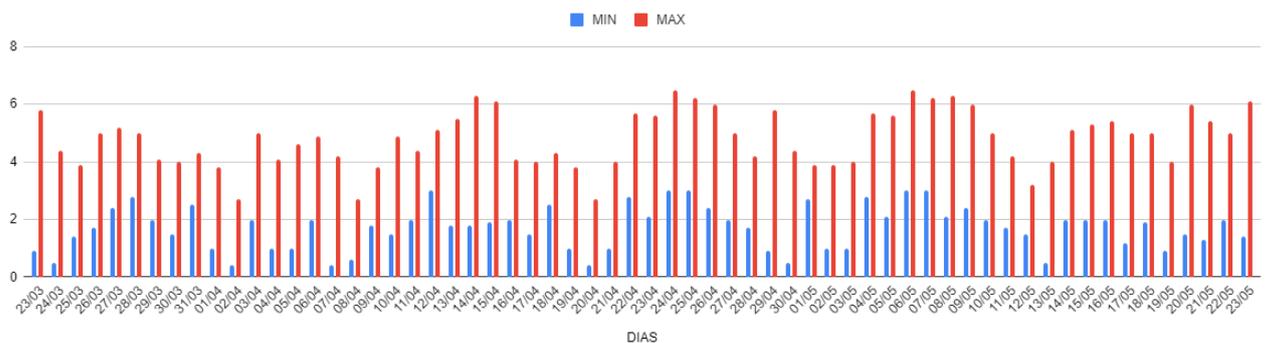
Dessa forma, com base na figura 28 e na tabela 10, foram examinados os potenciais locais para instalação, como o edifício C e o pavilhão esportivo, os quais são as elevações mais proeminentes do local em estudo. Considerando que a implantação do conjunto (com

quatro dispositivos) resulta em um aumento de potência para 4 kW e 14 quilogramas para cada aerogerador envolvido. O ambiente mais propício para a instalação de sua estrutura revelou-se o edifício C, com uma altura de 229 metros, devido à presença de um terraço de concreto que facilita a instalação da base, oferecendo uma estrutura estável e robusta para sustentar os aerogeradores sem pás. Por outro lado, o pavilhão esportivo, embora tenha sido considerado como opção, não pode suportar esse peso devido à sua estrutura que não permite novas construções acima.

A velocidade média diária dos ventos em Jequié - BA na gráfico da figura 36, analisados por um período de 2 meses, publicado no CPTEC, oscilou entre mínima de 0,4 m/s e máxima de 6,5 m/s. Desta forma, a partir dos resultados computados a velocidade média diária obtida de Jequié - Bahia, foi de 3,4 m/s possuindo assim valores positivos para a utilização dos aerogeradores.

Figura 36 – Velocidade diária dos ventos (m/s) – Jequié - BA (23/03/2024 a 23/05/2024).

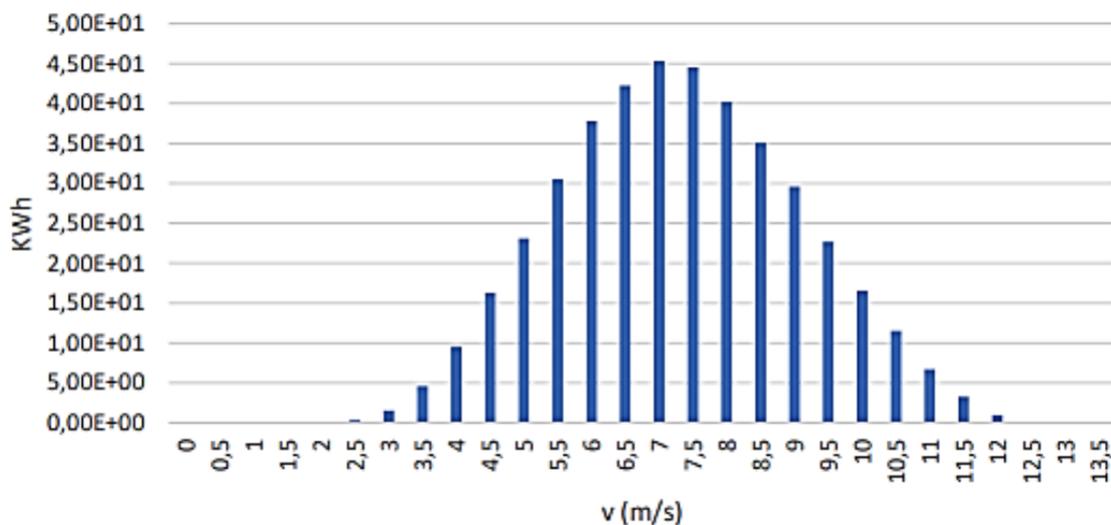
Velocidade diária (m/s) - Jequié BA 2024.



Fonte: o Autor (2024).

Para calcular a produção de energia elétrica do aerogerador Vortex Tacoma, utilizamos como referência o desempenho energético apresentado na figura 37.

Figura 37 – Geração de energia elétrica do aerogerador Vortex Tacoma.



Fonte: Gonzáles (2019).

Esses modelos começam a produzir energia com a mesma velocidade inicial do vento, conforme indicado pelos fabricantes, que é de 3 metros por segundo, e apresentam valores de velocidade nominal aproximados, em torno de 12 metros por segundo. No entanto, a principal vantagem do aerogerador por vorticidade é sua estrutura reduzida em comparação com outros modelos e a pequena distância de separação entre os equipamentos para sua instalação em um arranjo. Os resultados foram obtidos por meio da instalação do aerogerador Vortex Tacoma, bem como pela coleta e análise dos dados. Observa-se que uma quantidade limitada de energia foi gerada com ventos abaixo de 3 metros por segundo, que é considerada a velocidade mínima para o funcionamento do equipamento. Isso representa uma vantagem em comparação com os aerogeradores In-Vento e UGE-4K.

## 6 Conclusões

As propriedades dos ventos variam dependendo do contexto ambiental. Em Jequié - BA, os ventos são influenciados por elementos urbanos, como vegetação, edificações e topografia, afetando a velocidade do vento. O estudo de caso realizado no Instituto Federal da Bahia - Campus Jequié analisou a viabilidade técnica de três modelos de geradores de energia: o In-Vento (eixo horizontal), o UGE-4K (eixo vertical) e o Vortex Tacoma (vorticidade). Após a análise dos geradores de energia, foram comparadas particularidades de cada equipamento, como potência, altura da torre, diâmetro do rotor, velocidade inicial e velocidade nominal, além de outros parâmetros como, localidade e velocidade média dos ventos da região. Os três modelos de geradores de energia comparados operam com uma velocidade inicial dos ventos de 3 m/s e uma velocidade nominal de aproximadamente 12 m/s. A principal diferença é que o gerador de energia Vortex Tacoma possui uma potência e dimensões reduzidas em comparação com os modelos In-Vento e UGE-4K. O gerador de energia por vorticidade tem uma potência de 1 kW e um diâmetro de 0,261 metros, enquanto o In-Vento tem uma potência de 3 kW e um diâmetro do rotor de 3,4 metros, e o UGE-4K tem uma potência de 4 kW e um diâmetro do rotor de 4,2 metros.

O arranjo para a instalação do gerador de energia Vortex Tacoma foi analisado com base na simulação do desprendimento de redemoinhos de von Kármán em diferentes distâncias entre dois equipamentos. A simulação mostrou que distâncias menores entre os geradores aumentam a formação de redemoinhos, essencial para a geração de energia elétrica, resultando em maior produção de energia. Esse estudo pode ser replicado para outros tamanhos e diâmetros de geradores Vortex Tacoma de forma comparativa.

Além disso, contribuiu-se com a análise da implementação e do local de instalação do gerador de energia Vortex Tacoma. As simulações em softwares confirmaram o funcionamento do gerador por vorticidade e a amplificação do movimento da haste ressonante com baixas velocidades de vento. Com uma velocidade média diária de 3,4 m/s, o local (bloco c) é adequado para instalação do arranjo. Para obter dados mais precisos, recomenda-se aumentar o período de captação de velocidades para 12 meses, permitindo a análise dos melhores e piores meses. Além disso, é aconselhável utilizar um anemômetro no local de instalação para melhorar a precisão das medições. A análise estrutural do local de instalação dos geradores de energia Vortex Tacoma inclui o dimensionamento da estrutura e uma análise de cargas para garantir um funcionamento otimizado e maior produtividade na geração de energia elétrica. Pesquisas futuras podem explorar a otimização da distância entre os geradores, bem como diferentes materiais e designs para a haste ressonante, visando maximizar a eficiência e a durabilidade dos sistemas de geração de energia.

# Referências

- ABEEÓLICA. **ABEEÓLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica – Boletim anual de geração eólica**. 2023. Disponível em: <[https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2024/07/424\\_ABEEOLICA\\_BOLETIM-ANUAL-2024\\_DIGITAL\\_PT\\_V3.pdf](https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2024/07/424_ABEEOLICA_BOLETIM-ANUAL-2024_DIGITAL_PT_V3.pdf)>. Acesso em: 16/05/2024.
- ANEEL. **ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica**. 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br>>. Acesso em: 15/05/2024.
- ARAÚJO, P. S. F. O desenvolvimento da energia eólica no brasil: Uma revisão bibliográfica. **evista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, 10.51891/rease.v9i6.10487, Brasil, p. 12, 2023.
- BLADELESS, V. **Fundamentos da idea versão inicial**. Espanha: VORTEX BLADELESS, 2018.
- BLADELESS, V. **Fundamentos da ideia**. Espanha: VORTEX BLADELESS, 2020.
- CAJASA. **Projeto aerodinâmico de uma turbina eólica de eixo vertical (TEEV) para ambientes urbanos**. Brasil: TCC, 2016.
- CAMARINI, J. **Investigação experimental do efeito de interferência de tabuleiros paralelos de pontes em túnel de vento frente ao desprendimento de vórtices**. Barcelona: SHAPE Project Vortex Bladeless: Parallel multi-code coupling for Fluid-Structure Interaction in Wind Energy Generation., 2020.
- CPTEC. **Relatório anual de atividades 2020. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)**. Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2021.
- EDUARD, M. **Control strategy for variable speed, stall-regulated wind turbines**. EUA: Control strategy for variable speed, stall-regulated wind turbines., 1988.
- FIGUEIREDO, M. **Fundamentos da idea versão inicial. Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Positivo**, Universidade Positivo Curitiba, Brasil, p. 93, 2020.
- GONZÁLEZ, G. **Simulación del aprovechamiento del recurso eólico urbano con tecnología Vortex Bladeless**. Espanha: Trabalho de conclusion del curso, 2019.
- HIDALGO MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ; PASCUAL, R. A. **Diseño y optimización de una estructura geométrica cilíndrica para un desprendimiento uniforme de vórtices de Von Karman. Tecnología y desarrollo**. Barcelona: Article, 2017.
- J., V. D. **Investigação experimental do efeito de interferência de tabuleiros paralelos de pontes em túnel de vento frente ao desprendimento de vórtices**. Espanha: VIV resonant wind generators., 2018.
- MANWELL, M. **Estudo de utilização da energia eólica como fonte geradora de energia no brasil. Universidade Federal de Santa Catarina**, <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/123646>, Brasil, 2009.

- MARQUES, D. R. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias**. Brasil: Cepel Grupo Eletrobrás, 2008.
- MARTINS. Ação dinâmica do vento em edifícios altos. **Universidade Federal de Goiás**, <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/A>
- NÚÑEZ, G. **Investigação experimental do efeito de interferência de tabuleiros paralelos de pontes em túnel de vento frente ao desprendimento de vórtices**. Brasil: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, 2008.
- PINTO, M. Fundamentos de energia eólica. **Editora LTC**, <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/123646>, Brasil, 2014.
- REIS. Comparação de forças transversais analíticas do vento em modelo padronizado de edifício alto caarc. **Núcleo de Pesquisa e Inovação**, <https://revista.faculdadeprojecao.edu.br/index.php/Projecao4/article/view/1433/1167>, Brasil, p. 12, 2019.
- ROCHA, V. Patrícia Caroline Souza da. **Análise estrutural e arquitetônica das pontes de Robert Maillart com base no software Ansys**. Brasil: Trabalho de Conclusão de curso, 2016.
- RUI, C. **Introdução à energia eólica**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico DEEC, 2009.
- RUI, C. **INTRODUÇÃO À ENERGIA EÓLICA: Energias Renováveis e Produção Descentralizada**. Portugal: Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico DEEC / Área Científica de energia,, 2015.
- SCHUBEL, R. J. C. P. J. **Wind turbine blade design**. EUA: MDPI, 2012.
- SCHUBEL, R. J. C. P. J. **Cadernos Temáticos. Micro e Minigeração Distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Brasil: Centro de Documentação–Cedoc, 2016.
- SILVA, F. E. P. D. **Saberes da Engenharia: Uma contribuição para a sociedade**. Brasil: Estudo da ação do vento em uma edificação no bairro centro-sul na cidade de Manaus, 2024.
- TALES, L. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica de instalação de microturbina eólica**. EUA: TCC, 2011.
- TAVARES, C. D. **Micro e minigeração eólica e solar no Brasil: Propostas para desenvolvimento no setor**. São Paulo: Revista Científica ANAP Brasil, 2015.
- TOPOGRAPHIC-MAP. **TManual do Usuário In-Vento**. EUA: <https://manualdousuario.net/>, 2015.

## 7 Apêndice

Figura 38 – Primeira parte da planilha de velocidade média diária.

VELOCIDADE MÉDIA DIÁRIA - CPTEC		
DIAS	MIN	MAX
23/03	0,9	5,8
24/03	0,5	4,4
25/03	1,4	3,9
26/03	1,7	5
27/03	2,4	5,2
28/03	2,8	5
29/03	2	4,1
30/03	1,5	4
31/03	2,5	4,3
01/04	1	3,8
02/04	0,4	2,7
03/04	2	5
04/04	1	4,1
05/04	1	4,6
06/04	2	4,9
07/04	0,4	4,2
08/04	0,6	2,7
09/04	1,8	3,8
10/04	1,5	4,9
11/04	2	4,4
12/04	3	5,1
13/04	1,8	5,5
14/04	1,8	6,3
15/04	1,9	6,1
16/04	2	4,1
17/04	1,5	4
18/04	2,5	4,3
19/04	1	3,8
20/04	0,4	2,7
21/04	1	4
22/04	2,8	5,7

Fonte: Autores (2024).

Figura 39 – Segunda parte da planilha de velocidade média diária.

23/04	2,1	5,6
24/04	3	6,5
25/04	3	6,2
26/04	2,4	6
27/04	2	5
28/04	1,7	4,2
29/04	0,9	5,8
30/04	0,5	4,4
01/05	2,7	3,9
02/05	1	3,9
03/05	1	4
04/05	2,8	5,7
05/05	2,1	5,6
06/05	3	6,5
07/05	3	6,2
08/05	2,1	6,3
09/05	2,4	6
10/05	2	5
11/05	1,7	4,2
12/05	1,5	3,2
13/05	0,5	4
14/05	2	5,1
15/05	2	5,3
16/05	2	5,4
17/05	1,2	5
18/05	1,9	5
19/05	0,9	4
20/05	1,5	6
21/05	1,3	5,4
22/05	2	5
23/05	1,4	6,1

Fonte: Autores (2024).