



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CEAR – CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS
(PPGER)



**ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO PRODUZIDO PELO DESLOCAMENTO DE
AR DURANTE A PASSAGEM DE VEÍCULOS EM UMA RODOVIA FEDERAL: UM
ESTUDO DE CASO NA BR 101 NO ESTADO DA PARAÍBA**

EMMANUELLE CARNEIRO DE MESQUITA

João Pessoa/PB

2024

EMMANUELLE CARNEIRO DE MESQUITA

**ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO PRODUZIDO PELO DESLOCAMENTO DE
AR DURANTE A PASSAGEM DE VEÍCULOS EM UMA RODOVIA FEDERAL: UM
ESTUDO DE CASO NA BR 101 NO ESTADO DA PARAÍBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis

Orientadora: Profa. Dra. Taynara Geysa Silva do Lago

João Pessoa/PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M582a Mesquita, Emmanuelle Carneiro de.

Análise do potencial eólico produzido pelo deslocamento de ar durante a passagem de veículos em uma rodovia federal : um estudo de caso na BR 101 no Estado da Paraíba / Emmanuelle Carneiro de Mesquita. - João Pessoa, 2024.

93 f. : il.

Orientação: Taynara Geysa Silva do Lago.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energia eólica. 2. Potencial eólico. 3. Captação de energia - Veículo - Deslocamento do ar. 4. Deslocamento do ar - Veículo - Rodovia federal. I. Lago, Taynara Geysa Silva do. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621.548(043)



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA nº 108 da Sessão de Defesa Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

Ao trigésimo primeiro dia do mês de janeiro de dois mil e vinte e quatro foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas de forma PRESENCIAL, as 14h00, Sala 06 - Bloco da Pós-graduação do CCSA "Prof. Afrânio de Aragão a que se submeteu a defesa pública de **EMMANUELLE CARNEIRO DE MESQUITA**, matrícula **20211019830**, com o título "ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO DA RODOVIA BR 101 NO ESTADO DA PARAÍBA POR MEIO DA ANÁLISE DO FLUXO DE AR RESULTANTE DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS". A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: TAYNARA GEYSA SILVA DO LAGO (UFPB), MARCIO RODRIGO DE ARAUJO SOUZA (UFPB), OSWALDO HIDEO ANDO JUNIOR (UFRPE). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o(a) candidato(a) foi aprovada pela Comissão Examinadora. E, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

Observações: _____

Membros da Banca Examinadora:

Prof.^a. Dr.(a) **TAYNARA GEYSA SILVA DO LAGO**
Orientador(a)

Prof. Dr. **MARCIO RODRIGO DE ARAUJO SOUZA**
Examinador(a) Interno(a)

Prof. Dr. **OSWALDO HIDEO ANDO JUNIOR**
Examinador(a) Externo(a)

PPGER/CEAR/UFPB - Campus I, Caixa Postal 5115, CEP: 58051-900, João Pessoa - PB, Brasil.

Obs.(1): O discente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 45 dias a contar da data da defesa, os exemplares definitivos da dissertação.

Obs.(2): O docente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 20 dias a contar da data da defesa, o relatório de orientação para avaliação do colegiado.

EMMANUELLE CARNEIRO DE MESQUITA

**ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO PRODUZIDO PELO DESLOCAMENTO DE
AR DURANTE A PASSAGEM DE VEÍCULOS EM UMA RODOVIA FEDERAL: UM
ESTUDO DE CASO NA BR 101 NO ESTADO DA PARAÍBA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Taynara Geysa Silva do Lago – UFPB
(Orientadora)

Prof. Dr. Márcio Rodrigo de Araújo Souza
(Examinador interno)

Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior
(Examinador externo)

João Pessoa/PB

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado forças e permissão de estar presente neste momento, de ter conseguido chegar até aqui, por ter sido a base de toda a minha caminhada, e por me abençoar de todas as formas possíveis.

Agradeço a minha orientadora Professora Doutora Taynara Geysa Silva do Lago, pela competência, paciência e dedicação ao ofício do ensino, pela amizade e pelo apoio. Aos professores Márcio Rodrigo de Araújo Souza e Oswaldo Hideo Ando Junior por terem aceitado o convite para participar da banca de avaliação.

Agradeço aos meus familiares por sempre me motivar a não desistir, mesmo sabendo que a caminhada foi árdua.

Agradeço aos companheiros de curso por todo apoio durante esse período, em especial a Sidneia. A todos os demais que de algum modo contribuíram para este trabalho.

RESUMO

Diante do aumento da demanda por energia, há necessidade da utilização de mais fontes de energias renováveis que permitam um fornecimento sustentável contribuindo para a mitigação de impactos ambientais. A energia eólica é produzida da força dos ventos e é considerada uma fonte de energia limpa, conforme seja gerada, pode titular uma matriz alternativa utilizando novas tecnologias para tal produção. Há geradores eólicos em várias escalas e formas e opções não convencionais de protótipos têm sido proposto. Dentre eles, existe o aerogerador de pequeno porte que transforma o fluxo de ar gerado por veículos trafegando na rodovia em eletricidade, tornando-se uma fonte sustentável para infraestrutura e podendo ser utilizada para pequenas cargas nas redes principais. Esta dissertação analisou a velocidade do vento gerada pela passagem de veículos na Rodovia BR 101, km 101, no trecho do Estado da Paraíba. O potencial da energia eólica da rodovia originado por meio dos veículos em movimento pode atingir ventos de até 11 m/s dependendo da velocidade, intensidade e tamanho do veículo. A velocidade foi estimada por anemômetros digitais instalados nas laterais da Rodovia, onde registrava a velocidade em diferentes alturas e distâncias e variação de ângulos. Os resultados obtidos diante das condições climáticas registraram uma média eficiente e satisfatórias para produção de energia em pequena escala. As velocidades registradas pelo anemômetro *in locu* em comparativo com as registradas pela estação meteorológica do INMET se mostraram superiores, confirmando que as esteiras de vento criadas pelo deslocamento do veículo na via contribuem consideravelmente com o aumento da velocidade. Com base no potencial das velocidades de vento e altura do aparato experimental, foram selecionados cinco tipos de aerogeradores de pequeno porte comercial que podem girar em baixa velocidade. Dentre eles o modelo ENB-500W VAWT e ENB-300W-HQS VAWT se destacaram, apresentando desempenho superior que os demais. Por fim, diante de todo o levantamento de dados, comprovou que a captação de energia da rodovia é algo promissor, uma alternativa de geração de energia sustentável, dispondo de benefícios como, menos poluente, melhoria na saúde humana, economia a longo prazo, aplicação e incorporação no desenvolvimento energético do sistema público, beneficiando a sociedade.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Eólica; Potencial Eólico; Rodovia; Captação de energia.

ABSTRACT

Given the increase in demand for energy, there is a need to use more renewable energy sources that allow a sustainable supply, contributing to the mitigation of environmental impacts. Wind energy is produced from the force of winds and is considered a source of clean energy, as it is generated, it can be used in an alternative matrix using new technologies for such production. There are wind generators in various scales and shapes and unconventional prototype options have been proposed. Among them, there is the small wind turbine that transforms the air flow generated by vehicles traveling on the highway into electricity, becoming a sustainable source for infrastructure and can be used for small loads on the main networks. This dissertation analyzed the wind speed generated by the passage of vehicles on Rodovia BR 101, km 101, in the section of the State of Paraíba. Highway wind energy potential originating from moving vehicles can reach wind speeds of up to 11 m/s depending on the speed, intensity and size of the vehicle. The speed was estimated by digital anemometers installed on the sides of the Highway, which recorded the speed at different heights and distances and varying angles. The results obtained under the climatic conditions recorded an efficient and satisfactory average for small-scale energy production. The speeds recorded by the on-site anemometer compared to those recorded by the INMET meteorological station were higher, confirming that the wind wakes created by the movement of the vehicle on the road contribute considerably to the increase in speed. Based on the potential wind speeds and height of the experimental apparatus, five types of small commercial wind turbines that can rotate at low speed were selected. Among them, the ENB-500W VAWT and ENB-300W-HQS VAWT models stood out, presenting superior performance than the others. Finally, given all the data collection, it proved that capturing energy from the highway is something promising, an alternative for generating sustainable energy, offering benefits such as less polluting, improvement in human health, long-term savings, application and incorporation into the energy development of the public system, benefiting society.

KEYWORDS: Wind Energy; Wind Potential; Highway; Energy Harvesting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Emissões históricas do GEE.....	18
Figura 2. Tendências de capacidades instaladas no Brasil.	18
Figura 3. Capacidade Eólica no mundo.....	22
Figura 4. Matriz elétrica Brasileira em GW.	24
Figura 5. Evolução da capacidade instalada em MW, no Brasil.	25
Figura 6. Capacidade instalada e número de parques eólicos por estado.....	26
Figura 7. Regiões com potencial eólico na Paraíba.	27
Figura 8. Representação do funcionamento de um aerogerador.....	28
Figura 9. Diferentes tipos de turbinas Savonius analisadas em relação ao número de estágios: (a) um estágio; (b) dois estágios; (c) três estágios.	30
Figura 10. Diferentes tipos de turbinas eólicas de eixo vertical (VAWT): (a) Savonius; (b) Darrieus com "ovo" rotor de design do batedor; (c) Lâminas em forma de H; (d) Lâminas de forma de hélice.	31
Figura 11. Três lâminas da turbina Darrieus.	32
Figura 12. Diferentes visões da turbina eólica sob investigação com tamanho característico em mm (na parte superior). Plano ortogonal para o eixo de rotação (no canto superior esquerdo), plano contendo o eixo de rotação (no centro superior) e visão de perspectiva.	32
Figura 13. Dornier Darrieus/ Savonius 5,5 KW.....	33
Figura 14. Consumo energético no transporte de cargas, por modo, no Brasil. Litros de gasolina equivalente (LGE).....	34
Figura 15. Consumo do setor de transportes por fonte de energia (mil tep).....	34
Figura 16. Consumo Energético por modo e fonte.....	35
Figura 17. Contagem contínua de veículos.	35
Figura 18. Gráfico da Frota de Veículos da Paraíba.....	36
Figura 19. Evolução da frota e da população da Paraíba 2011-2018.....	36
Figura 20. Os 10 Municípios com maior frota de veículos da Paraíba.	37
Figura 21. Fontes disponíveis de captação de energia em estrada.....	37
Figura 22. Princípio de funcionamento da célula solar fotovoltaica.....	39
Figura 23. A estrutura básica de três camadas do módulo de pavimento fotovoltaico .	39
Figura 24. Efeito Seebeck.	40
Figura 25. Mapa do fluxo de calor no território brasileiro.....	41

Figura 26. Mapa do fluxo de energia geotérmica no território brasileiro.....	42
Figura 27. Princípio de funcionamento do efeito piezoelétrico sob (a) tensão zero; (b) tensão; e (c) compressão.	43
Figura 28. Projeto da rodovia Smart Highway na Holanda. Turbinas eólicas que transforma a energia da passagem do veículo em energia. O projeto é chamado de Luz de vento.	44
Figura 29. Primeira implantação mundial de turbinas Alpha 311 para Telford.	45
Figura 30. Funcionamento da turbina Apha311.	45
Figura 31. Levantamento de 15anos da rosa dos ventos anuais.	46
Figura 32. Fluxo de ar de uma turbina eólica em funcionamento.....	48
Figura 33. A média de velocidade do vento entre 1991 e 2020 na cidade de João Pessoa.	55
Figura 34. A velocidade do vento no ano de 2022 na cidade de João Pessoa.....	56
Figura 35. A velocidade do vento no ano de 2023 na cidade de João Pessoa.....	56
Figura 36. Valores típicos do comprimento característico da rugosidade do solo h_0 .	57
Figura 37. Localização geográfica da zona de medição: Avenida Paraíba, Zona 4, BR.	59
Figura 38. Anemômetro Btmeter BT-866^a	60
Figura 39. Anemômetro Minipa MDA-20.	60
Figura 40. Convalidação dos aparelhos.	60
Figura 41. Aparato experimental da primeira coleta de dados. Ângulo de 0°, 45° e 90°, distância de 0,50 m,1m e 1,5 m e altura de 0,50 m, 1 m, 1,5 m.	61
Figura 42. As orientações utilizadas para primeira coleta de dados com os anemômetros.	62
Figura 43. Aparato experimental da segunda coleta de dados. Ângulo de 0°, 45° e 90°, distância de 0,50 m,1m e 1,5 m e altura de 0,50 m.....	63
Figura 44. Aparato experimental da terceira coleta de dados. Ângulo de 0°, 45° e 90°, distância de 0,50 m,1m e 1,5 m e altura de 0,50 m.....	64
Figura 45. Função de Weibull para a cidade de João Pessoa, entre 1991 e 2022.....	65
Figura 46. Função de Weibull para os dados obtidos na rodovia.....	66
Figura 47. Potência estimada da turbina EN 100W – XL na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da primeira coleta.	74
Figura 48. Potência estimada da turbina EN 100W – HX na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da primeira coleta	74

Figura 49. Potência estimada da turbina EN 500W – XL na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da primeira coleta.	75
Figura 50. Potência estimada da turbina ENB 500W na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da primeira coleta.	75
Figura 51. Potência estimada da turbina em 300W-HQS na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da primeira coleta.	76
Figura 52. Potência estimada da turbina Aelos V 300W na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da primeira coleta.	76
Figura 54. Potência estimada da turbina EN 100W – XL na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da segunda coleta.	91
Figura 55. Potência estimada da turbina EN 100W – HX na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da segunda coleta.	91
Figura 56. Potência estimada da turbina EN 500W – XL na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da segunda coleta.	92
Figura 57. Potência estimada da turbina ENB 500W na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da segunda coleta.	92
Figura 58. Potência estimada da turbina ENB 500W na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da segunda coleta	93
Figura 59. Potência estimada da turbina Aelos V 300W na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da segunda coleta	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização do vento em função da altitude de João Pessoa.....	67
Tabela 2. Velocidade do vento medida de veículos em movimento, utilizando as alturas de 0,50 m,1m e 1,5 m e os ângulos de 0°, 45° e 90° na distância de 0,50 m.	67
Tabela 3. Velocidade do vento medida de veículos em movimento, utilizando as alturas de 0,50 m,1 m e 1,5 m e os ângulos de 0°, 45° e 90° na distância de 1 m.....	68
Tabela 4. Velocidade do vento medida de veículos em movimento, utilizando as alturas de 0,50m,1m e 1,5m e os ângulos de 0°, 45° e 90° na distância de 1,5m.....	68
Tabela 5. Velocidade do vento medida de veículos em movimento, utilizando a altura de 0,50 m e os ângulos de 0°, 45° e 90° nas distâncias de 0,50 m, 1 m e 1,5 m.....	70
Tabela 6.Velocidade do vento medida de veículos em movimento, utilizando a altura de 0,50m e os ângulos de 0°, 45°e 90° nas distâncias de 0,50m, 1m e 1,5m.	71
Tabela 7. Aerogeradores de pequeno porte comercial com características compatíveis com o resultado do experimento.....	72
Tabela 8. Descrições técnicas das turbinas comerciais.	73

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Geral	15
1.2.2 Específicos	15
1.3 Estrutura do trabalho.....	16
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 Energias Renováveis.....	16
2.2 Energia Eólica.....	19
2.2.1 Energia Eólica: Fundamentos.....	19
2.2.2 Energia Eólica: Mundial.....	20
2.2.3 Energia Eólica: Brasil	23
2.2.4 Energia Eólica: Nordeste e Paraíba.....	26
2.3 Aerogeradores	28
2.3.1 Turbina Savonius VAWTs	30
2.3.2 Turbina Darrieus VAWTs	31
2.3.3 Turbina Darrieus- Savonius VAWTs	32
2.4 Consumo de energia no setor de transporte rodoviário.	33
2.5 Frotas de veículos na paraíba	35
2.6 Métodos e técnicas de captação de energia para aplicações rodoviárias.	37
2.6.1 Captação de energia solar (PV)	38
2.6.2 Captação de energia Termoelétrica	40
2.6.3 Captação de energia geotérmica.	41
2.6.4 Captação de energia piezoelétrica.	42
2.7 . Aerogeradores de pequeno porte em rodovias	43
3. ANÁLISE DO VENTO	46
3.1 Características do clima e vento da paraíba.....	46

3.2	Análise analítica	46
3.2.1	Potência extraída do vento.....	46
3.2.2	Rendimento de Betz.....	48
3.2.3	Distribuição Estatística de Weibull	52
4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	55
4.1	Levantamento da central meteorológica	55
4.2	Metodologia experimental	58
4.2.1	Planejamento	58
4.2.2	Zona Geográfica.....	58
4.2.3	Setup e validação de ensaio	59
4.3	Primeira coleta de dados.....	61
4.3.1	Aparato Experimental	61
4.3.2	Coleta de Dados	61
4.4	Segunda coleta de dados.....	62
4.4.1	Aparato experimental.....	62
4.4.2	Coleta de dados	63
4.5	Terceira coleta de dados	63
4.5.1	Aparato Experimental	63
4.5.2	Coleta de Dados	64
4.6	Processamento e tratamento dos dados.....	64
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1	Medição do vento – primeira coleta	67
5.2	Medição do vento – segunda coleta	69
5.3	Medição do vento – terceira coleta	70
5.4	Análise do processamento de dados para utilização de aerogeradores de pequeno porte.....	71
6.	CONCLUSÃO	77
7.	TRABALHOS FUTUROS	78
	REFERÊNCIAS.....	79
	APÊNDICE	91

1. INTRODUÇÃO

A energia tem um papel muito importante no mundo, onde variados setores como a indústria, comércio, saúde, agricultura e demais serviços são dependentes dela, isso mostra como a energia afeta no crescimento da economia e no desenvolvimento do país, onde um fornecimento deficiente atinge a lucratividade e produtividade local (Xu *et al.*, 2022).

Atualmente o mundo enfrenta três grandes desafios na área da energia: segurança no fornecimento, pobreza energética e mudanças climáticas. A pobreza energética como um dos problemas a ser enfrentado mundialmente tem atraído atenção internacional e acadêmica, onde refere-se especialmente a falta de obter instalações limpas e combustíveis como também a serviços de energia equivalente (Zhao *et al.*, 2022).

O *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report (2022)* informa que mais de um bilhão de pessoas em todo o mundo tiveram acesso na última década a eletricidade, mas a crise financeira ocorrida pela COVID-19 até o momento tornou inacessível o acesso básico à eletricidade para mais de 30 milhões de pessoas. Os países mais frágeis e atrasados ao acesso a eletricidade foram os mais atingidos, como África e Ásia, onde mais de 90 milhões de pessoas tinham acesso a eletricidade e hoje não conseguem arcar com o uso básico.

Em 2021, registrou-se um aumento significativo por combustíveis fósseis, cerca de 9%, algo nunca visto a muitos anos, relacionando toda essa situação aos sistemas de eletricidade.

Apesar do cenário, a energia renovável foi a única fonte que houve crescimento durante a pandemia. Toda essa performance surge faltando apenas oito anos para alcançar o acesso universal à energia acessível e sustentável, meta 7 do Objetivo e desenvolvimento sustentável-ODS, 2030 (ODS, 2019).

O Brasil é um dos países que tem a maior população com acesso a eletricidade, cita os Indicadores Brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (PERCENTAGEM, 2019), apresentando em torno de 99,8%, motivo para se preocupar, tendo em vista a crise energética que o país vem enfrentando. Assim sendo, de extrema importância e fundamental avanço para a energia limpa e sustentável busca proteger a saúde humana e promover populações mais saudáveis, especialmente em áreas remotas e rurais (Faerstein, 2021).

Lima *et al.* (2020) dizem que a crise energética foi causada por mudanças climáticas, onde o país enfrentou um período de grandes secas, causando preocupação pela sua grande dependência à fonte de energia hidrelétrica, por esse motivo, o governo vem incentivando a diversificação da matriz energética, principalmente no uso das fontes de energias renováveis.

O País é auto sustentável em recursos renováveis para produção de eletricidade como, eólica, biocombustíveis, solar entre outros, que são recursos naturais restabelecidos (Cardoso, 2018).

Com a evolução tecnológica, o aumento da população humana e as questões ambientais, a busca por novas fontes de energia tornou-se necessária para a geração de eletricidade, uma vez que os recursos energéticos convencionais do mundo são limitados, apontadas como aquelas que trazem benefícios ambientais, econômicos, sociais e de saúde as fontes de energias renováveis, promovendo também a universalização do acesso, com melhorias na segurança energética, qualidade do ar, desenvolvimento tecnológico, redução de tarifas e industrial (Silva, 2020). Por esses motivos o reaproveitamento da energia desperdiçada vem ganhando interesse mundial (Tian *et al.*, 2020).

Segundo os dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA, 2021), o Brasil vem se destacando de forma exemplar entre os demais países, no tocante à disponibilidade de fontes energéticas renováveis e seu potencial uso, tendo em vista, sua dimensão territorial e a faixa de latitude geográfica favorável, se apresentando como uma nação das poucas do mundo em que há abundância de recursos hídricos, incidência de radiação solar, ventos e biomassa, podendo alavancar em direção a uma matriz elétrica praticamente renovável em sua totalidade.

A energia eólica e solar vem ganhando espaço a cada dia, por serem soluções eficientes e eficácia para resolver questões como, emissões de carbono, falta de petróleo e da grande demanda do consumo da eletricidade. No mesmo momento vem surgindo inúmeros projetos em desenvolvimento para aumentar a contribuição de energias renováveis no mundo como também entregar metas estabelecidas mundialmente. Muitos planos de contribuição de vários governos vêm surgindo para facilitar essas instalações (Yang *et al.*, 2018).

A captação de energia exige cada vez um sistema de energia eólica aérea (AWES) eficaz que possa transmitir essa energia renovável disponível às pessoas. Por outro lado, a limitação de recursos eólicos por barreiras como arranha céus e terrenos irregulares afeta a performance do sistema (Ali *et al.*, 2021), porém, as turbinas eólicas de pequeno porte têm grandes vantagens em áreas subdesenvolvidas onde a aplicação de energia é de baixo consumo.

Divulgada pela IEA em 2019 na Tarefa 41 que trata de energia distribuída, os padrões atuais das turbinas de pequeno e médio porte são recursos confiáveis e econômicos e vem ganhando espaço no longo dos anos.

Nas últimas décadas foram criados vários protótipos de turbinas de pequeno porte patenteados, com o intuito de captar a energia cinética criada pela passagem do veículo nas autoestradas (Santhakumar *et al.*, 2017).

Nas vias de mão dupla, a direção do vento é dividida em duas, no centro, onde a energia eólica é proveniente das duas direções dos veículos em movimento, e o lado da estrada com energia eólica de uma direção do veículo. Neste trabalho é apresentado uma análise completa dos dados de medição da velocidade do vento gerada pela passagem de veículos numa rodovia da Paraíba.

1.1 Justificativa

O movimento dos veículos em alta velocidade pode gerar fortes esteiras de energia eólica localizada, onde essa energia pode ser transformada em energia elétrica por meio do uso das turbinas eólicas de pequeno porte (Tian *et al.*, 2020).

A energia eólica produzida nas rodovias, pela maioria das vezes desperdiçada, tem um potencial de produção de energia eólica alto, levando em consideração a grande quilometragem e alto tráfego de veículos diários (Tian *et al.*, 2020).

A BR 101 é uma das principais vias que atravessam o estado da Paraíba, sendo de grande importância para o fluxo de caminhões e, conseqüentemente, do abastecimento de insumos externos para o estado, assim como da acessibilidade a outros estados por turistas e habitantes locais (DNIT, 2021). Assim, esta dissertação analisa o potencial eólico do fluxo de vento gerado através da passagem do veículo em movimento, na BR 101, Km 101, no trecho do Estado da Paraíba, com finalidade de guiar a seleção de aerogeradores de pequeno porte para impulsionar esta forma de energia alternativa e limpa que vem se expandindo por vários países, podendo ser aproveitada na própria rodovia, contribuindo com o desenvolvimento sustentável em prol a sociedade.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de uma metodologia de medição do potencial eólico da Rodovia BR 101, com finalidade de servir como base para a seleção e instalação de aerogeradores de pequeno porte.

1.2.2 Específicos

- Caracterizar, de acordo com uma distribuição de Weibull, dados de vento coletados em bases meteorológicas, por exemplo, INMET, para a localidade João Pessoa.

- Realizar métodos de medição da velocidade do vento para diferentes alturas na zona geográfica estudada;
- Estimar o potencial de geração teórico que poderia ser extraída e o teor médio de energia, a partir das medidas de velocidade de vento (corrente livre) para a determinada altura;
- Selecionar aerogeradores de pequeno porte disponíveis no mercado, que melhor se adequa com os resultados obtidos de velocidade;
- Servir de referência para futuros trabalhos que objetivem o desenvolvimento de aerogeradores de pequeno porte para rodovias.

1.3 Estrutura do trabalho

Esse trabalho está dividido em 6 Capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a Introdução, os Objetivos e a Justificativa. O Capítulo 2 aborda a revisão de literatura onde são destacados os seguintes tópicos: Energias renováveis, energia eólica, Aerogeradores, consumo de energia no setor de transporte rodoviário, como também, frotas de veículos na Paraíba, técnicas de captação de energia para aplicações rodoviárias e aerogeradores de pequeno porte em rodovia.

No Capítulo 3 é realizada a análise do vento, com tópicos que tratam das características do clima e vento da Paraíba, além das equações do estudo analítico.

Já no Capítulo 4 é exibida a metodologia desenvolvida para as medições de velocidade, como também os materiais utilizados. Os resultados das medições e a seleção dos aerogeradores de pequeno porte comerciais são apresentados no Capítulo 5. Por fim, uma conclusão é exposta no Capítulo 6 e logo seguinte o Capítulo 7 mostra sugestões de trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Energias Renováveis

Nos últimos anos, com a carência mundial de energia e o aumento da preocupação global com a proteção ambiental, busca e avanço das energias renováveis, vem transformando a direção comum do comando dos governos para a utilização de recursos (Zhao *et al.*, 2022).

O termo renovável refere-se a vários recursos sustentáveis de energia renovável, que tem se tornado uma das principais tendências em todo o mundo nas duas últimas décadas, e entre as diversas formas de energia “limpa” a energia eólica tem se destacado entre todas as energias renováveis modernas (Ismaeel *et al.*, 2020).

A energia renovável é um sistema limitado em carbono e mais sustentável, se tornando cada vez mais afamado pelo seu papel menos poluente (Rahman *et al.*, 2020). A Agência Internacional de Energia (AIE) com uma visão otimista, acredita que em 2050 as energias renováveis terão um aumento de 39%. De acordo com o mesmo órgão a taxa de crescimento global das energias renováveis anual é aproximadamente 3%, sendo a fonte que mais cresce mundialmente (Zafar *et al.*, 2019).

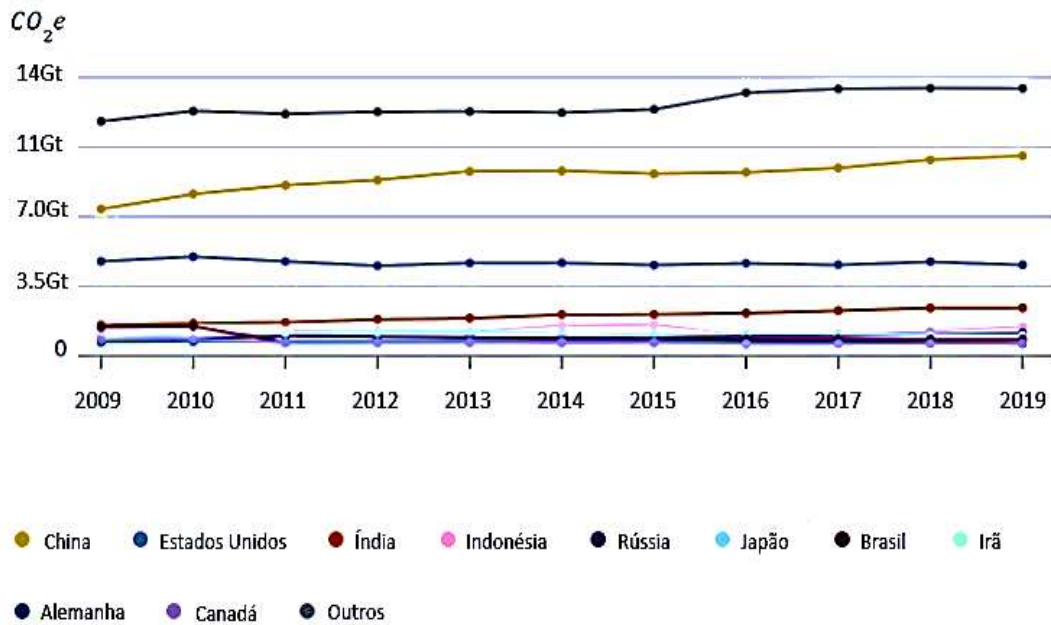
Fechar a lacuna entre o desenvolvimento econômico e as emissões de carbono é uma forma de atingir o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS). As energias renováveis vêm cumprindo um papel de grande importância no reequilíbrio das condições econômicas e ambientais, isso vem sendo discutido em debates (Saidi *et al.*, 2020).

Segundo o relatório da Agência Internacional de Energia (IRENA,2022), o mundo adicionou quase 257 gigawatts (GW) de energias renováveis, crescendo o estoque de energia renovável em 9,1%, respondendo por quase 95% do aumento da capacidade de energia no mundo até 2025.

A capacidade global de geração renovável totalizou 3.064 GW, o desenvolvimento de geração de energia tem sido bem significativo nos diferentes locais de produção perfazendo uma aprovação de 159,67 MW, onde a maioria, 135,99 MW ou 85% do total tem sido de empreendimentos eólicos, enquanto que a menor parte surge de pequenas centrais hidrelétricas (11%) e de termelétricas (4%), como explica Rodrigues, (2022).

O Friedrich, 2021 traz dados onde confirma que o País que mais emite GEE no mundo é a China, como se observa na Figura 1, logo em seguida surge o Estados Unidos. Ambos são responsáveis por mais de 30% do GEE global, enfrentando inúmeras pressões para reduzirem as emissões. A China se comprometeu até 2030 atingir seu pico de emissões e aumentar a participação de energias renováveis para cerca de 20% (Ji *et al.*, 2019).

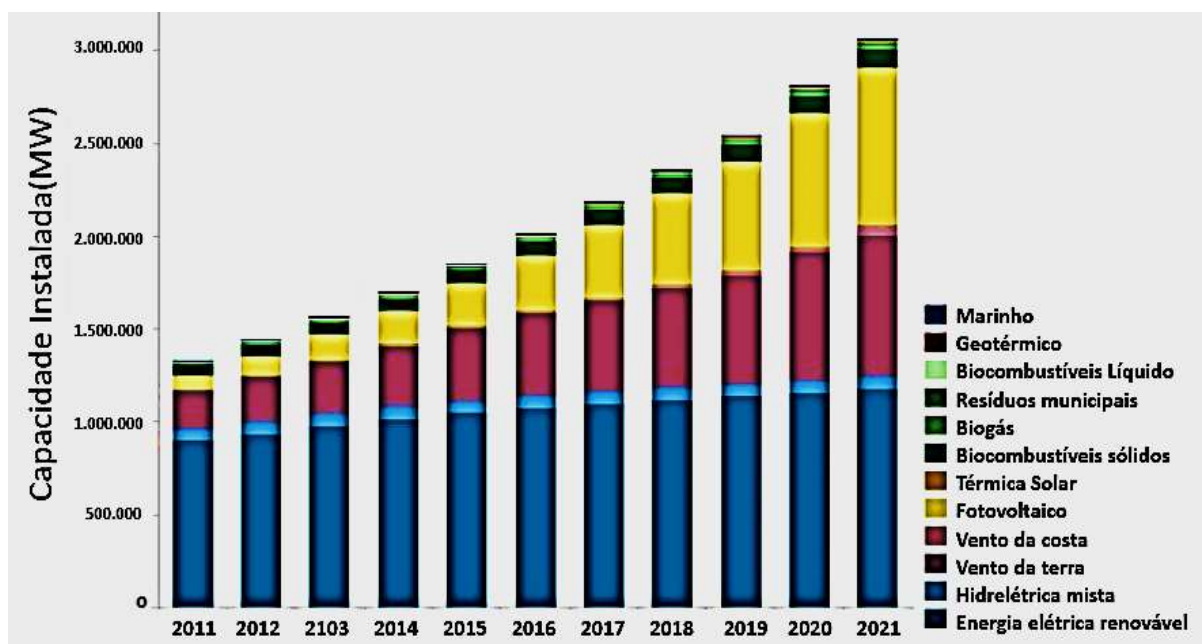
Figura 1. Emissões históricas do GEE.



Fonte: WRI, 2022.

O uso de energia renovável no Brasil tem colocado o país em uma posição de destaque no cenário regional e global. A matriz brasileira é vista como uma das mais renováveis do mundo com uma proporção de 48%, e quase 50% da energia energética produzida no Brasil vem de fontes renováveis como pode ser visualizado na Figura 2, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (Osório, 2021).

Figura 2. Tendências de capacidades instaladas no Brasil.



Fonte: IRENA, 2022 (adaptado).

A energia renovável é regulamentada por políticas públicas onde mundialmente, houve um crescimento considerável nos últimos anos. Essas políticas variam de acordo com o governo que a apoia.

O Banco de Dados de Políticas da Agência Internacional de Energia informa que 126 países dispõem de políticas de energias renováveis ativas, que contêm uma vasta variedade de fontes e tecnologias.

As políticas públicas abrangem desde instrumentos regulatórios, incentivo financeiro, planos estratégicos, tarifas, subvenções, investimentos diretos ou códigos, e são implantados nacional e estadual. Apesar das políticas entre países variarem de acordo com as tecnologias implantadas, inserir o maior número de tecnologias existentes no sistema, oferece uma rigorosa estimativa de possíveis consequências na justiça ambiental (Levenda *et al.*, 2021).

Santhakumar *et al.* (2017) explica que a energia eólica é uma das energias renováveis que têm ganhado significativamente atenção na geração de energia quando comparada com a energia solar, pela eficiência de conversão de energia elétrica, nas turbinas eólicas é maior, quando comparada aos painéis solares fotovoltaicos, e pela disponibilidade do recurso de vento ser durante o dia e noite.

Vários governos lançaram políticas de incentivos para contribuir com o desenvolvimento das energias renováveis (Yang *et al.*, 2018).

Estima-se que, a energia renovável obtenha um crescimento entre os anos de 2020-2030 em torno de dois terços, caracteriza 80% do consumo global de energia elétrica (Zhao *et al.*, 2022).

Tradicionalmente a energia eólica é uma das tecnologias mais antigas, que data há milhares de anos, nomeadamente através da utilização de moinhos de vento pelos persas e outras civilizações antigas. Essa moderna tecnologia de energia foi estabelecida apenas 200 anos atrás com os parques eólicos pioneiros nos Estados Unidos. No entanto, a Dinamarca foi o país pioneiro no desenvolvimento de turbinas eólicas comerciais. A perfeição desta tecnologia cresceu rapidamente nas últimas décadas com a crescente demanda por energia renovável e desafios das mudanças climáticas (Bani-hani *et al.*, 2018).

2.2 Energia Eólica

2.2.1 Energia Eólica: Fundamentos

O vento é o ar em movimento onde o sol é seu principal gerador, onde aquece a terra em várias temperaturas. O ar aquece mais rapidamente acima da terra do que acima da água durante o dia. O ar mais quente sobe quando ele aumenta, nesse momento o ar frio e mais pesado entra no seu devido lugar, gerando ventos. Já à noite, os papéis se invertem e o ar esfria mais rápido na superfície da terra do que na água. Durante o tempo que existir esse ciclo, haverá vento (Balashanmugam *et al.*, 2019).

O vento é um recurso energético renovável e, portanto, inesgotável, utilizado em algumas regiões do planeta, com uma frequência e intensidade suficientes, para gerar eletricidade utilizando equipamentos específicos (Sadorsky *et al.*, 2021).

A coleta de energia pelas turbinas eólicas tradicionais é produzida pelo vento que é convertido em energia mecânica pela rotação da lâmina, logo após, os geradores a transformam em energia elétrica (Ren *et al.*, 2021). A transformação da energia eólica em energia mecânica se embasa nos fundamentos de conservação da energia, massa e impulso (Al-aqel *et al.*, 2016).

A energia eólica apresenta anualmente um crescimento em torno de 12% da capacidade instalada de 2015 a 2016 e tem capacidade de sozinha cumprir 20% das demandas mundiais de energia até 2030 (Saleem *et al.*, 2017).

A situação climática são condições críticas que influenciam na operação das turbinas eólicas. O vento é um fator de extrema importância, pois atinge não só a geração de energia como também o agendamento de manutenção (Yang *et al.*, 2021).

O uso da energia eólica apresenta inúmeras desvantagens atualmente, os custos preliminares para instalação das grandes turbinas, são bem mais altos em comparação as usinas tradicionais, outro fator é a análise dos locais promissores para instalação, que deverá trazer dados precisos, tendo em vista, que não são peças de fácil locomoção, um fator também muito importante, são as áreas de grande potencial energético que estão distantes das redes, onde irá requerer linhas de transmissão (Yan *et al.*, 2019).

As turbinas variam de tamanho, sendo a pequena capaz de gerar até 10 KW, já as maiores, tem capacidade até 10.000 KW. O fator mais importante para avaliar a capacidade de geração de energia é o tamanho das lâminas (Bashir, 2021).

2.2.2 Energia Eólica: Mundial

O vento tem se tornado uma opção promissora para o desenvolvimento dos recursos renováveis nos últimos anos para a geração de eletricidade (Saleem *et al.*, 2017).

A energia eólica, em 2018, alcançou uma capacidade instalada mundial acumulada de 591.549 MW centralizada na Europa, Ásia e América do Norte. A energia eólica *onshore*, no

mesmo ano, forneceu em torno de 30% da eletricidade da Dinamarca, 20% na Alemanha, 24% na Irlanda e Portugal e 18% na Espanha. De 1983 a 2017, vem diminuindo o custo de instalação de USD 4 880 para USD 1 477/KW alcançando custos médios de 4 centavos por KWh, com o menor do Brasil, Alemanha, Canadá, México, Índia e Marrocos (Martínez-Mendoza *et al.*, 2021).

A *Global Wind Energy Council* (GWEC) informa que no final de 2020 tinha um total de 35 GW de energia eólica offshore mundialmente, isso representa um número quatorze vezes maior que dez anos atrás. A capacidade se manteve estável se comparado a 2019 com 6,1 GW. Em 2021 a China, grande líder do setor nessa última década, ultrapassou o Reino Unido com a maior capacidade instalada.

A Europa, EUA e Ásia, vem em crescimento de capacidade instalada, um espelho do novo presidente Biden, que adotou a energia eólica como uma das opções de recuperação verde, definindo uma meta de 30 GW até 2030 (Dutton, 2021).

China, Índia, EUA, Alemanha e Espanha são os que lideram as cinco posições, onde 73% da capacidade total global de energia eólica, são ocupados por eles (Peng *et al.*, 2021).

A COP27 de 2022, trará como principal tema a importância do avanço da energia eólica para solucionar ambas as crises, energia e clima, assim informa a *Global Wind Energy Council* (Manifesto,2022), onde o ano de 2021 registrou mundialmente pico de emissão de dióxido de carbono. Acreditam que a indústria eólica poderá desempenhar um papel indispensável na produção de energias renováveis a custo competitivo, pois a energia produzida pelo vento oferece inúmeros benefícios.

Como pode ser visto na Figura 3, os dois maiores mercados eólico do mundo em 2021 foram a China e EUA, embora tenham alojado menos capacidade eólica terrestre, a China permaneceu sendo o responsável por 80% do crescimento em instalações eólica *offshore*, ultrapassando o Reino Unido como o maior mercado em instalações cumulativas. Também nas instalações *onshore* representando 78% ficaram os países China (343,8 GW), Estados Unidos (134,8 GW), Alemanha (63,9 GW), Índia (40,1 GW) e Espanha (28,1 GW).

Figura 3. Capacidade Eólica no mundo.

País/Região	2018	2019	2020	Taxa de crescimento	Nova capacidade	2021
				2021	2021	
China	209'529	236'029	288'029	19,40%	55'800	343'829
Estados Unidos	96'363	105'433	122'328	10,20%	12'518	134'846
Alemanha	59'313	61'357	62'208	2,80%	1'716	63'924
Índia	35'129	37'529	38'625	3,80%	1'475	40'100
Espanha	23'494	25'808	27'446	2,70%	750	28'196
Reino Unido	20'743	23'515	24'167	10,90%	2'645	26'812
Brasil	14'707	15'452	18'010	18,60%	3'355	21'365
França	15'313	16'646	17'949	6,30%	1'132	19'081
Canadá	12'816	13'413	13'627	5,00%	677	14'304
Suécia	7'406	8'985	9'922	21,90%	2'175	12'097
Resto do mundo	94'719	105'618	120'147	12,50%	15'019	135'166
Total	589'547	649'785	742'458	13,10%	97'272	839'730

Fonte: GWEC, 2022 (Adaptado do autor).

O crescimento mundial do mercado eólico offshore surgiu em 2017, com um aumento de 30% em relação ao ano anterior da sua capacidade instalada, alcançando o seu recorde histórico. Sua ampliação aconteceu nos países europeus que investiram cedo no setor como, Dinamarca, Escócia, Holanda, Inglaterra, Alemanha, em seguida os EUA, Índia, Canadá, Taiwan, Turquia, Japão, China e Austrália (González *et al.*, 2020).

Na capacidade global dos sistemas de armazenamento de energia, um estudo realizado pela consultoria *Wood Mackenzie* aponta que poderá ocorrer um crescimento com taxa anual composta de 31%, atingindo 741 gigawatts-hora (GWh) em 2030, demonstrando assim, que as aplicações à frente do medidor, destinadas às distribuidoras, transmissoras e geradores de energia, continuarão a dominar o setor, respondendo por 70% da capacidade inserida instalada anualmente até o final da década.

Na liderança da capacidade global estão os EUA respondendo por 49%, 365 GWh da capacidade global acumulada até 2030, a China vem em segundo lugar com a expectativa de crescimento exponencial, representando 21% ou 153 GWh da capacidade global acumulada ao final da década.

Embora a indústria eólica continue avançando, o crescimento para o nível necessário buscando se alcançar emissões líquidas zero e segurança energética, demandará uma nova abordagem muito mais proativa para uma formulação de políticas em todo o mundo (Machado, 2022).

2.2.3 Energia Eólica: Brasil

A energia eólica nasceu no Brasil em 1992, com um aerogerador instalado no arquipélago de Fernando de Noronha. Onde antes a priorização do país era a geração de energia por Hidrelétricas, pelo baixo custo da instalação, mais o país começou a sofrer pressões internacionais para geração de energia limpa que viesse a diminuir a emissão do efeito estufa (Sampaio *et al.*, 2021).

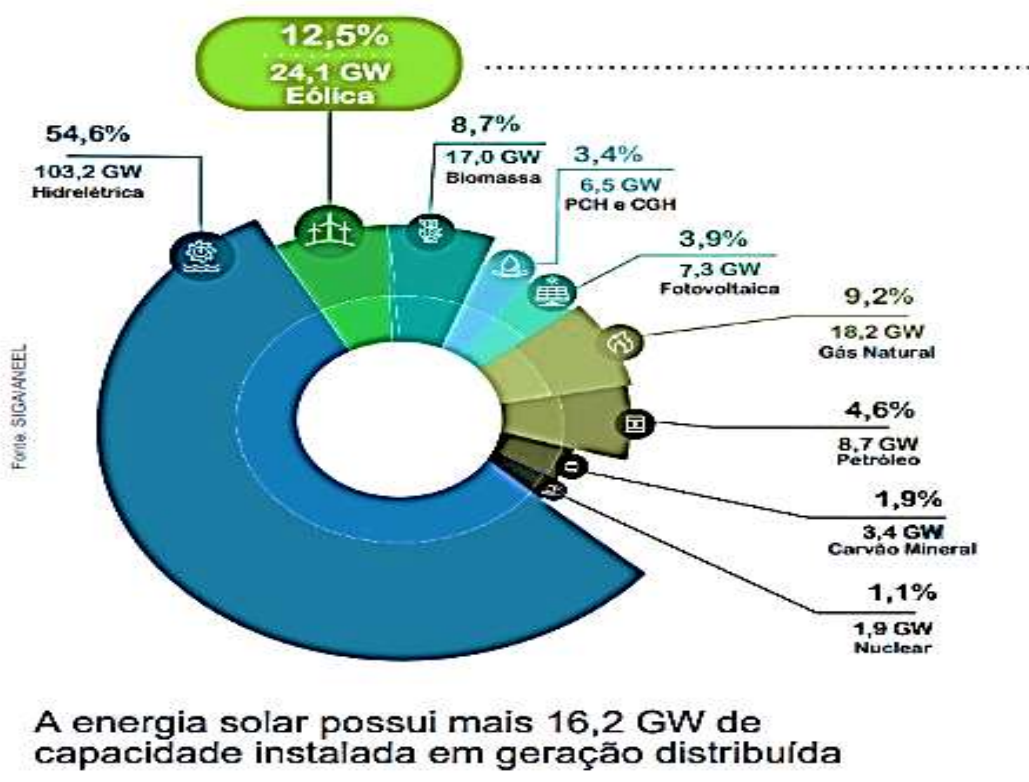
No Brasil, a comercialização da energia eólica teve início com a PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), instituído pelo governo brasileiro de 2002, onde seu principal objetivo era aumentar a contribuição da energia eólica, biomassa e pequenas hidrelétricas no sistema elétrico brasileiro.

As tarifas da energia eólica variaram de USD 76,98 a USD 87,31 por MWh, os valores atualizados variam de USD 104,80 a USD 118,86. No período, esse índice comparado a outros setores, era muito alto, motivo para os críticos não acreditarem que o setor eólico alavancaria no país. Em dezembro de 2009 aconteceu o primeiro leilão do setor eólico, com preços atrativos, participaram 339 usinas, com capacidade total aproximada de 10.000 MW. O resultado tornou o setor eólico um ramo competitivo no país (De Bona *et al.*, 2021).

O crescimento da energia eólica no Brasil foi um conjunto de combinação de política industrial e energética. Uma dessas políticas é o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), onde contrata energia através de leilões, outra seria Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), que fornece financiamento (González *et al.*, 2020). O Brasil registra fartura de ventos de alta efetivação comercial e seu uso é constante em locais de alta pobreza (Galvão *et al.*, 2020).

Apesar de ainda apresentar pequena participação no mercado eólico mundial, o Brasil apresentou um considerável crescimento em sua capacidade instalada na última década. Com o surgimento de incentivos governamentais designados ao setor, lograram êxito em crescer a participação eólica na matriz elétrica brasileira, representando 12,5% de toda geração injetada no Sistema Interligado Nacional (SIN), oferecendo 24 GW de capacidade como demonstrado na Figura 4, assim destaca a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2023).

Figura 4. Matriz elétrica Brasileira em GW.



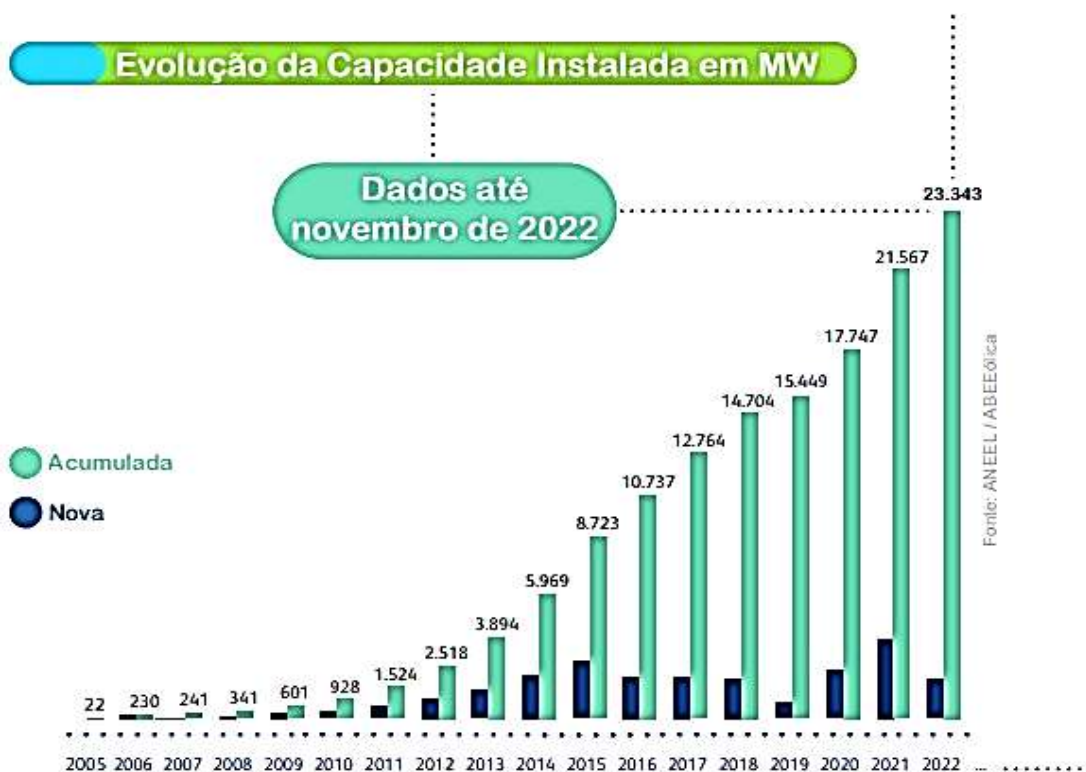
Fonte: ABEEólica, 2023.

O potencial instalado de energia eólica no Brasil, o garante na sexta posição internacional entre as dez principais nações com a maior capacidade mundial no ano de 2022, sendo líder na América latina, onde em 2012 sua posição era décima quinta colocação no ranking mundial, assim destaca o relatório do Global Wind Energy Council (2022).

Em 2005 a capacidade do Ceará era 28,6 MW e demonstrou um aumento em julho de 2017 para 1,7 GW.

O Brasil demonstrou uma evolução abundante na sua capacidade em energia eólica podendo chegar até 40,4 GW até 2026 como mostra a Figura 5 (ABEEólica, 2023).

Figura 5. Evolução da capacidade instalada em MW, no Brasil.



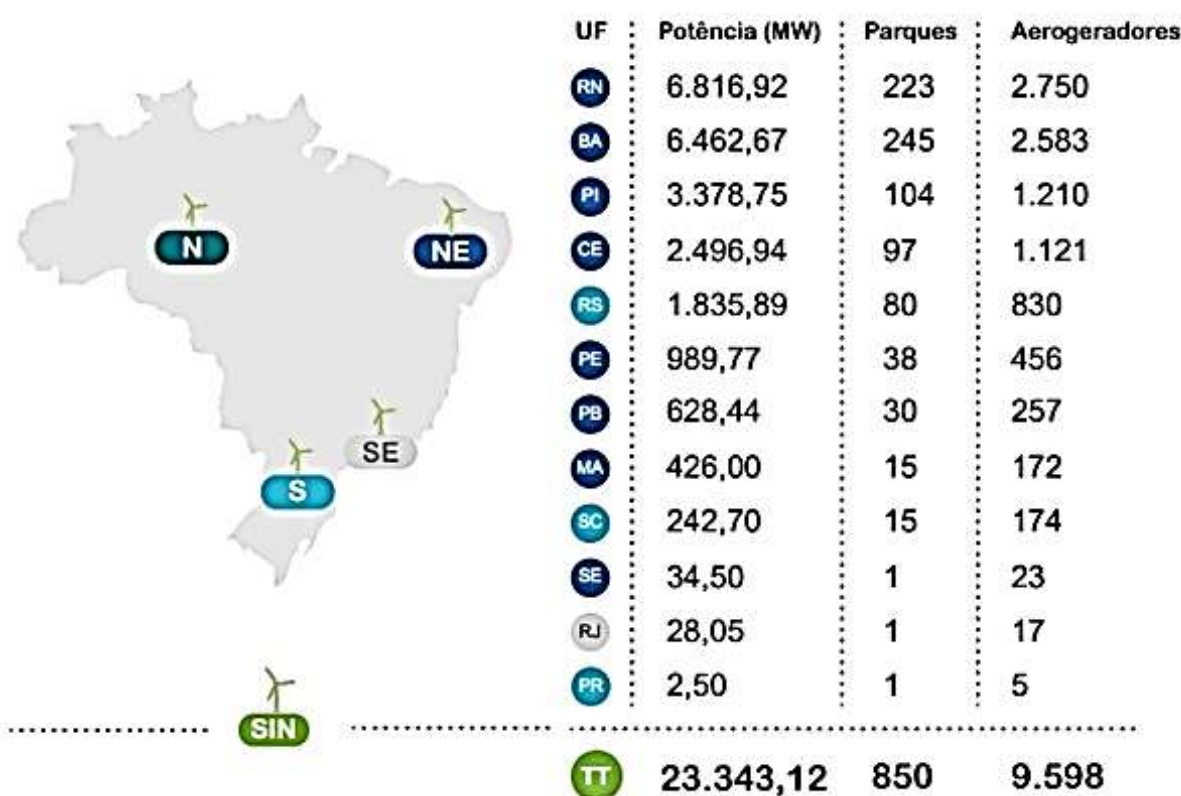
Fonte: ABEEólica, 2023.

Vinhosa *et al.* (2021) afirma que o Brasil apesar de estar bem colocado no ranking mundial de instalação eólica *Onshore*, e *offshore* é visto como um mercado em desenvolvimento, onde não existem usinas instaladas no país. Mais de seis projetos offshore estão em fase de licenciamento ambiental, sendo aprovados, irão adicionar mais de 10 GW de capacidade eólica ao país.

A maior capacidade instalada de energia eólica do Brasil está concentrada na região Nordeste, em seguida a região Sul, como ilustra a Figura 6 (DIUANA *et al.*, 2019).

A região nordeste do país tem ventos favoráveis a produção de energia eólica, por serem constantes de intensidade forte a moderada e durante o ano todo o vento praticamente se comporta de forma unidirecional, esse é um dos motivos que faz a região contribuir com a maior parte de geração de energia eólica injetada no Sistema Interligado Nacional (SIN), em média 85% (Duarte Jacondino *et al.*, 2021).

Figura 6. Capacidade instalada e número de parques eólicos por estado.



Fonte: ABEEólica, 2023.

Benefícios técnicos de baixos custos de instalação e custos de geração competitiva também são fatores que contribuem para a expansão do setor eólico (Galvão *et al.*, 2020).

Estima-se que até 2070, com o aumento da velocidade dos ventos estimados da região Norte e Nordeste do país, poderá mais do que dobrar comparando com 2001, e em 2100 pode até triplicar esse número de referência (De Jong *et al.*, 2019).

Rodrigues (2022) afirma que na região Nordeste as unidades parques eólicos autorizados com as melhores performances estão localizados nos estados do Piauí, Maranhão, Rio Grande do Norte e Ceará. Atualmente, são 795 parques eólicos brasileiros e mais de 9 mil aerogeradores em operação. Para o ano de 2026, a previsão é de pelo menos 36 mil MW. Enquanto os dois maiores mercados do mundo, China e Estados Unidos, instalaram menor capacidade eólica *Onshore* no ano passado - 30,7 mil MW e 12,7 mil MW, respectivamente - outras regiões tiveram anos recordes.

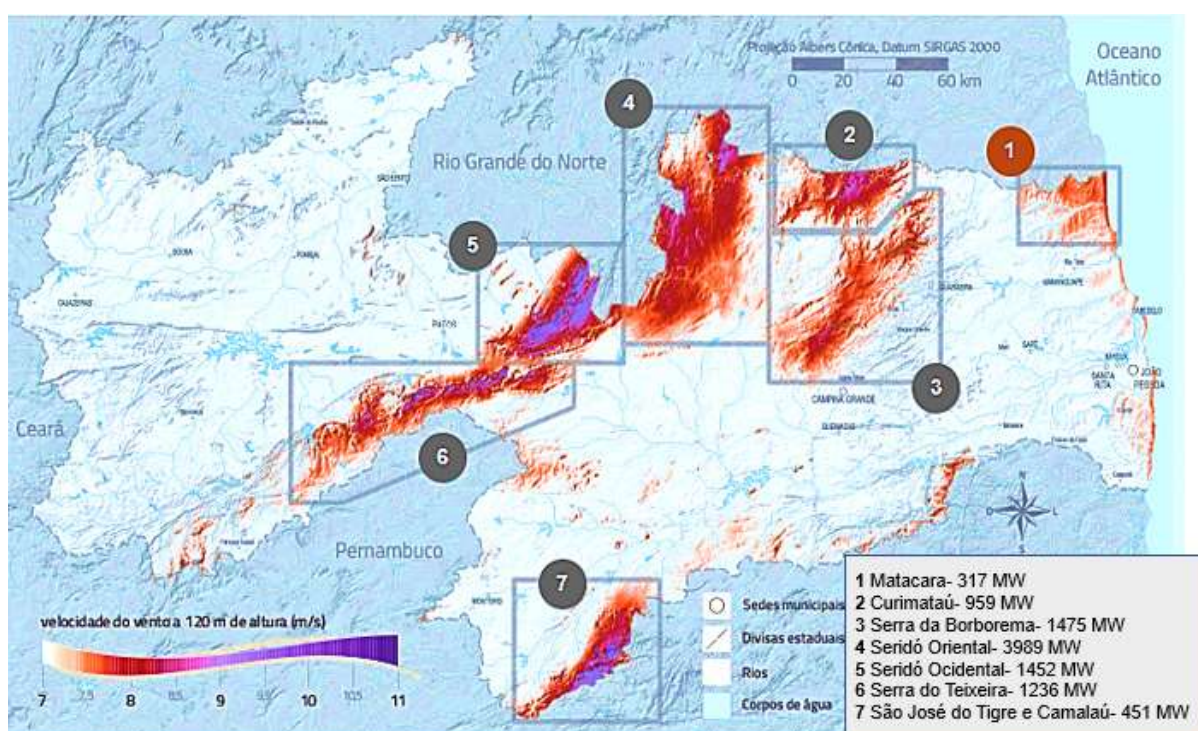
2.2.4 Energia Eólica: Nordeste e Paraíba

A Região Nordeste tem tido um crescimento nítido nos últimos anos de energia eólica. Os investimentos no setor se deram em razão as suas condições climáticas, potencial eólico e localização geográfica da região (Cunha *et al.*, 2022).

O Atlas eólico (2013) demonstra no mapa Brasileiro as regiões de maior potencial eólico se destacando o Nordeste, onde o Rio Grande do Norte e a Bahia são os maiores produtores de energia eólica.

Na Paraíba existe sete regiões que demonstra potencial eólico na altura de 120m demonstrado na Figura 7. O estado tende um crescimento constante de projetos eólicos a serem instalados. O arrendamento de terra por parte dos investidores para instalação de parques eólicos vem beneficiando moradores e abrindo oportunidade de empregos para população local (Cartaxo, 2020).

Figura 7. Regiões com potencial eólico na Paraíba.



Fonte: Atlas eólico, adaptado 2023.

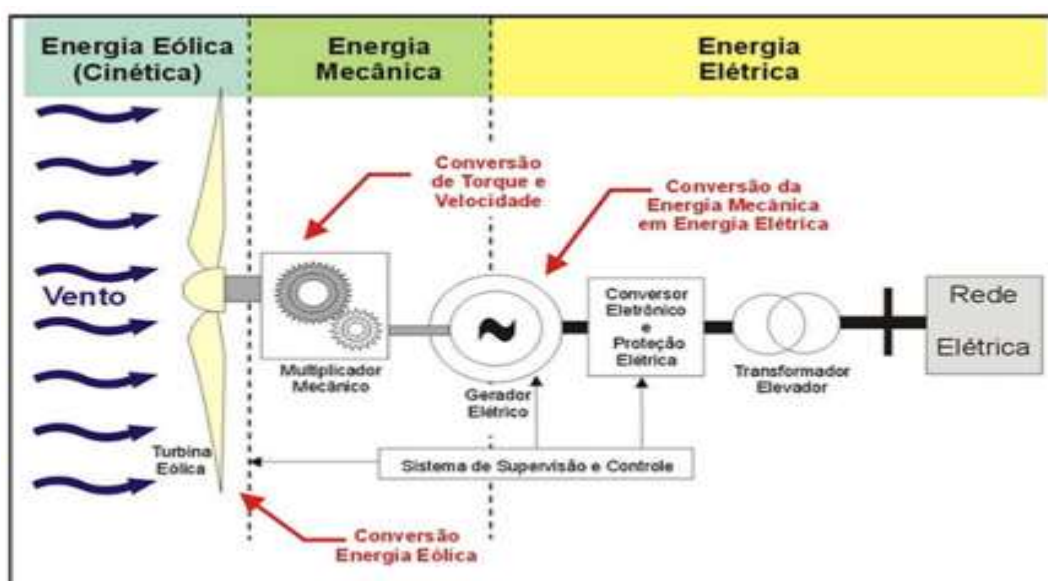
Atualmente a Paraíba tem 21 parques eólicos em funcionamento com capacidade instalada de 337,38 MW, e estão sendo construídos mais 9 parques eólicos, onde prever acrescentar 266,87 MW a sua capacidade, somando também 14 outorgados que atinge 589,14 MW. Na capacidade da sua matriz se totaliza 1,10 GW, onde 43,5% são de energias renováveis e 56,5% não renováveis. Após a conclusão das novas instalações se espera que a sua matriz energética atinja 3,06 GW, assim sendo, passará a 79,5% renováveis e 20,4% não renováveis (Governo, 2021).

Os parques eólicos estão instalados nos municípios de São José do Sabugi, Santa Luzia, Areia de Baraúnas, São Mamede, Mataraca e Junco do Seridó.

2.3 Aeroeradores

A turbina eólica transforma energia eólica em eletricidade, e é composta por torre, nacele e rotor (Jiang *et al.*, 2018). Em geral, são usados materiais compostos para fabricação das lâminas, já as naceles são produzidas de aço e cobre e as torres são construídas de aço e concreto. As lâminas são as peças principais de uma turbina. A Figura 8, representa a transformação da energia elétrica.

Figura 8. Representação do funcionamento de um aeroerador.



Fonte: Picolo, 2014.

A matriz energética eólica é dividida de acordo com o ambiente onde será gerada: citamos o parque eólico *onshore* e o *offshore* (Vaicberg *et al.*, 2021). A *onshore* tem vantagens pelo menor custo de instalação e capacidade técnica já comprovada em relação à *offshore*, por sua vez oferecem maiores impactos ambientais afetando diretamente os moradores locais (Lee *et al.*, 2020).

O parque eólico *offshore*, é instalado no mar a 10 km da costa com fundação de 10 m, e devem estar acima das ondas mais altas. Cabos subterrâneos e instalações especiais são necessários para o funcionamento e manutenção (Wu *et al.*, 2019).

O Relatório Global de Vento *Offshore* lançado pelo *Global Wind Energy Council* (Global, 2022), mostra que a indústria eólica *offshore*, teve em 2021 seu maior desempenho, com nova capacidade de 21,1 GW conectada à rede, e acreditam que esse número continuará em crescimento. No Brasil não existe parque eólico *offshore*, mas já foram desenvolvidos

projetos que seguem em aprovação ambiental, inclusive, instalação no mar nordestino (Vaicberg *et al.*, 2021).

O parque eólico *onshore* são construções em terra com fundações rasas ou empilhadas (Wang *et al.*, 2020) e utilizam ventos do continente para geração de eletricidade, tem um custo de instalação mais barata, porém, oferecem maiores impactos ambientais (Ladenburg *et al.*, 2020).

Os procedimentos reais de turbinas eólicas (*offshore* e *onshore*) são consideravelmente atingidos pelas condições climáticas, em especial pelas condições do vento. As condições de saúde e a produção de tempo da unidade são determinados diretamente pela velocidade do vento. Como exemplo temos as manutenções que não devem ser realizadas em condições de ventos severos por motivo de segurança (Yang, 2021).

Zhao *et al.* (2022) argumentam que existem diferentes tipos de geradores eólicos, mas todos utilizam a mesma estrutura básica e componentes para funcionar, entretanto, existem dois tipos de geradores: as turbinas eólicas de eixo vertical (VAWTs) apresentam vantagens consideráveis em relação às turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWTs) devido à sua direcionalidade, melhor estabilidade estrutural e do sistema.

Pallottas et al (2020) afirmam que a VAWTs se sobressai da HAWTs por inúmeras qualidades como:

- Sistema unidirecional;
- Execução de trabalho mesmo com fluxos turbulentos;
- Torque de partida baixo;
- Sistema de funcionamento acoplado ao lado da base da turbina;
- Emissão de ruídos reduzidos.

As turbinas de eixo horizontal (HAWTs) são bastantes conhecidas por sua eficiência e instalação em parque eólico (Mohan kumar *et al.*, 2018), utilizadas para geração de grande escala, já as de eixo vertical (VAWTs) para produção de uso doméstico (Balashanmugam, 2019).

De acordo com Wang *et al.* (2018), os HAWTs são globalmente adotados para geração de eletricidade em unidades de energia eólica comercial de grande escala tanto *onshore* quanto *offshore*, enquanto que os VAWTs são classificados em turbinas do tipo drag (Savonius) e do tipo elevador (Darrieus), pouco usados devido à sua baixa eficiência.

As turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWTs) são a maior parte de turbinas instaladas, mas desenvolvimentos recentes mostram o futuro promissor das turbinas eólicas verticais (VAWTs) para aplicações acessíveis (Patil *et al.*, 2018).

Pallotta et al (2020) comenta que as turbinas eólicas de eixo vertical (VAWTs) simboliza uma das alternativas mais promissoras para geração de energia eólica em escalas pequenas (com tamanhos entre 1m a 10m e pequena velocidade de vento, entre 3 m/s a 20 m/s).

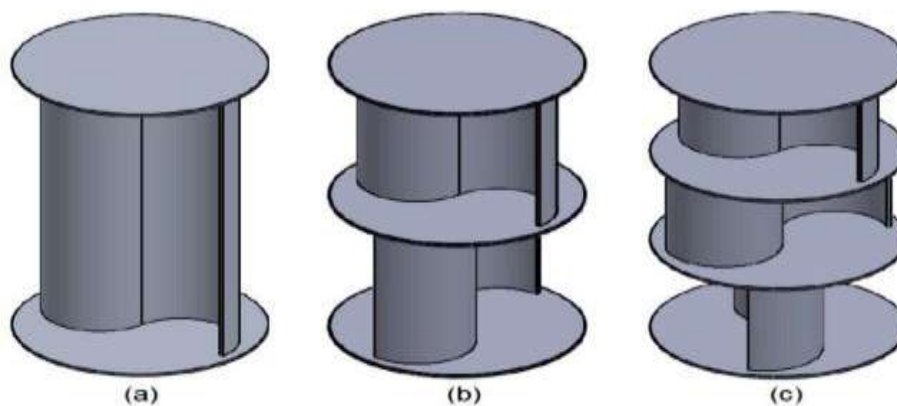
2.3.1 Turbina Savonius VAWTs

A Turbina Savonius foi criada em 1929 por Singurd Johannes Savonius, um arquiteto finlandês (Cardoso, 2018). A turbina Savonius VAWTs, é mais indicada em regiões com velocidades de vento baixo, pelo seu maior desempenho de partida (Xu *et al.*, 2021).

A turbina Savonius têm benefícios diversos em facilidade de fabricação, baixo ruído e simplicidade, como também a sua geração de energia em baixa velocidade e pequeno custo. Essas características são o que desperta o interesse de otimizar seu desempenho (Antar *et al.*, 2020). Não são recomendadas para geração de grande escala, em consequência do seu desempenho aerodinâmico ser baixo e alta abundância de ventos. Constitui-se de duas ou mais lâminas de perfil semicircular integrada ao eixo central (Mohan Kumar, 2018).

Essa turbina é referência na sua admirável inicialização, se desenvolvem em fluxos de ventos, e suas lâminas são de fácil fabricação. Essas características o tornam um dispositivo interessante a ser explorado (Antar *et al.*, 2020), como demonstra a Figura 9.

Figura 9. Diferentes tipos de turbinas Savonius analisadas em relação ao número de estágios: (a) um estágio; (b) dois estágios; (c) três estágios.

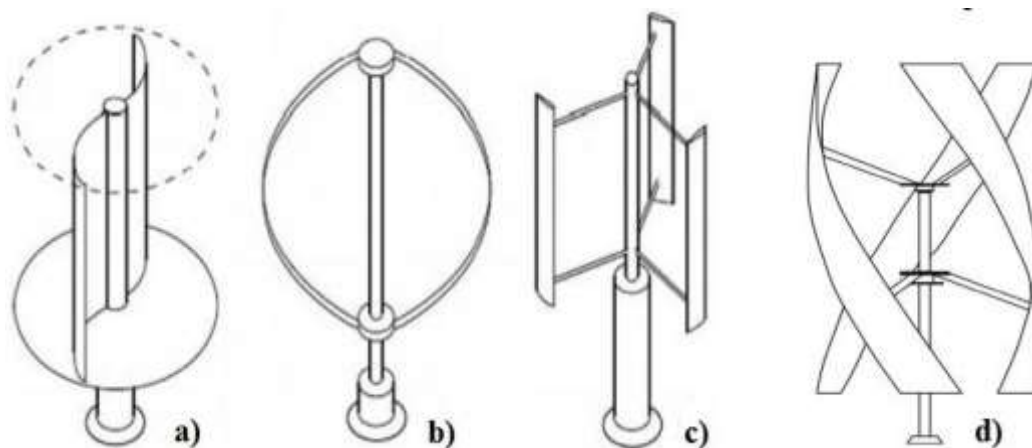


Fonte: Bianchin, 2020.

2.3.2 Turbina Darrieus VAWTs

A Turbina Darrieus foi criada pelo Engenheiro francês George Darrieus, em 1931, tem uma grande potência e uma eficiência semelhante às turbinas de eixo horizontal de 3 pás. Essa turbina é a única de eixo vertical utilizada para fins comerciais assim afirma Cardoso (2018). A Darrieus é um tipo de turbina de eixo vertical (VAWTs) e tem um maior potencial aerodinâmico (Xu *et al.*, 2021). Essa turbina é instalada com duas ou três lâminas simultaneamente ao eixo da turbina (Mohan Kumar *et al.*, 2018), observado na Figura 10.

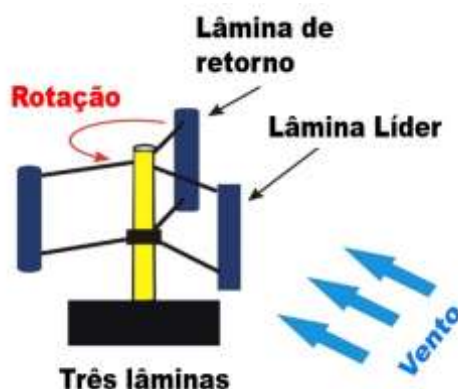
Figura 10. Diferentes tipos de turbinas eólicas de eixo vertical (VAWT): (a) Savonius; (b) Darrieus com "ovo" rotor de design do bateador; (c) Lâminas em forma de H; (d) Lâminas de forma de hélice.



Fonte: Castelani, 2019.

A principal qualidade é ser unidirecional como mostra a Figura 11, assim, funciona em qualquer direção do vento. Outra característica não menos importante e que a destaca dos demais modelos, é seu design de fabricação simples, fácil manutenção e fácil instalação (Hashem *et al.*, 2018). Classifica como desvantagens a incapacidade, baixa eficiência e deficiência para tomar partida onde é instalado um dispositivo extra para começar a rotação da turbina até atingir a rotação da taxa (Mohamed *et al.*, 2019).

Figura 11. Três lâminas da turbina Darrieus.



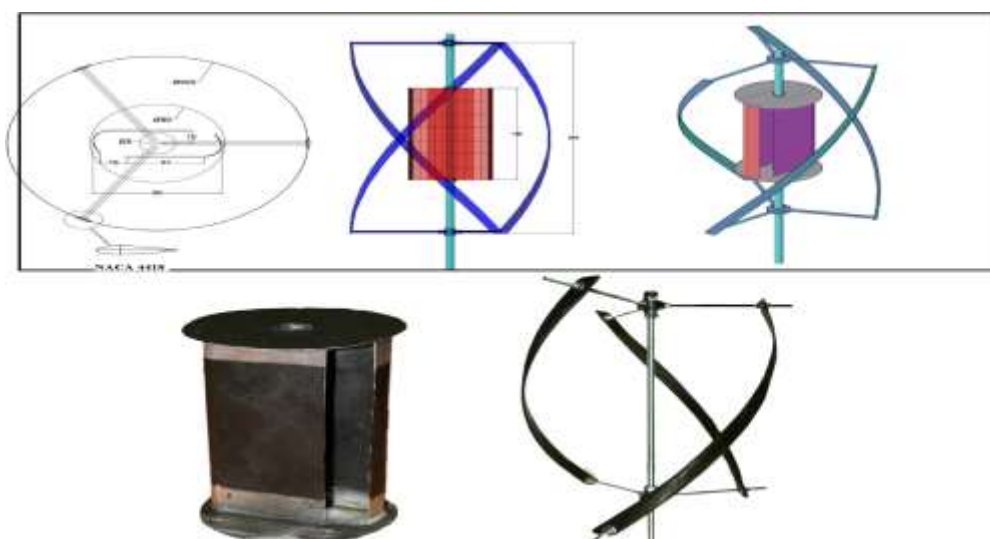
Fonte: Mohamed, 2019.

2.3.3 Turbina Darrieus- Savonius VAWTs

Esse tipo de turbina faz uma mistura de modelos, a Darrieus e a Savonius, conforme as Figuras 12 e 13, combinando os dois rotores no mesmo eixo. Esse mix de modelos integrados contribui para alcançar um aproveitamento de em torno 51% (Cardoso, 2018).

O rotor de Savonius é aplicado no meio do rotor da Darrieus, dessa forma o coeficiente de potência aumenta, aumentando também o desempenho dessa turbina combinada (Sahim *et al.*, 2018). Essa combinação do rotor híbrido apresenta excelentes características de partidas e melhor aproveitamento de energia em grande velocidade de fluxo (Liu *et al.*, 2019).

Figura 12. Diferentes visões da turbina eólica sob investigação com tamanho característico em mm (na parte superior). Plano ortogonal para o eixo de rotação (no canto superior esquerdo), plano contendo o eixo de rotação (no centro superior) e visão de perspectiva.



Fonte: Pallotta, 2020.

Figura 13. Dornier Darrieus/ Savonius 5,5 KW.



Fonte: Wind Tirbune, 2022.

2.4 Consumo de energia no setor de transporte rodoviário.

As estradas desempenham um papel muito importante, é através delas que é realizada a conexão e movimentação de pessoas, além de ser a principal infraestrutura civil é uma plataforma que transporta cargas de tráfego (Wang *et al.*, 2020). O setor de transporte necessita de muita energia proveniente de combustíveis fósseis, aumentando a emissão de gases estufas (Nicolau *et al.*, 2020).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética-EPE (ATLAS, 2021), o setor mais afetado pela pandemia da COVID-19, foi o setor de transportes. No ano de 2020 o consumo energético do país teve uma queda de 2,9% comparado ao ano anterior, uma taxa abaixo do PIB, 4,1%, já em 2021 recuperou 7,3% em relação a 2020 que foi atingido pela COVID-19, assim informa o relatório do Balanço Energético Nacional (Balanço, 2022).

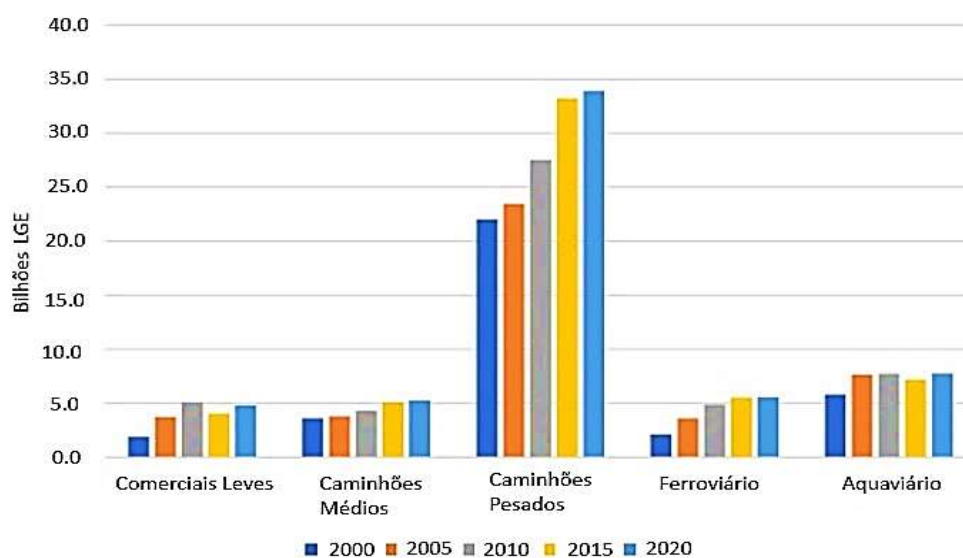
O consumo de energia no setor de transporte é influenciado por fatores como: o PIB, o crescimento da infraestrutura, as políticas de mobilidade e ambientais, novas tecnologias, preferências das pessoas e maior conectividade.

O relatório Benchmarking Internacional (2021), demonstra a evolução do setor de transportes nacional e internacional, como também o avanço energético do setor e o uso de combustíveis alternativos. Foi destacado que os caminhões pesados no Brasil têm um papel

muito significativo, foram os que mais consumiram energia no setor ao longo do tempo, um acréscimo de 219% entre os anos de 2000 a 2020, representado pela Figura 14.

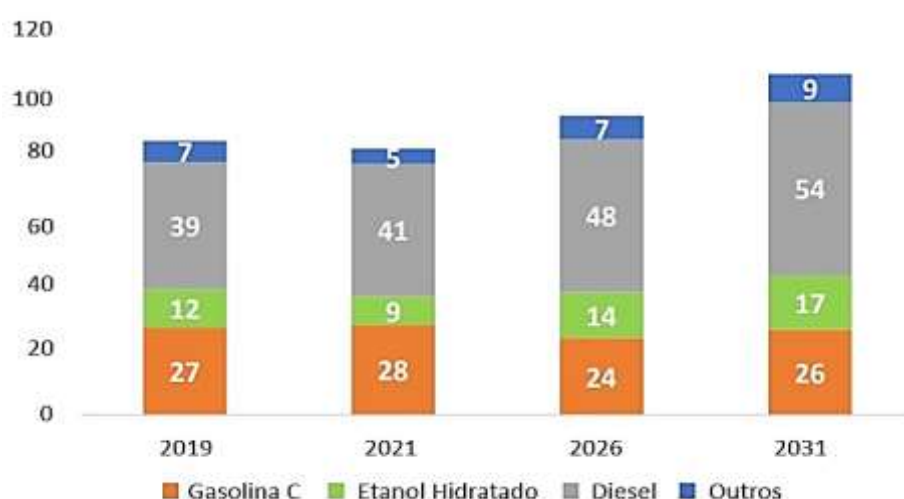
Estima-se entre 2021 e 2031 um aumento de 2,5% a.a. para o consumo de energia neste setor, com mais evidência ao óleo diesel, querosene de aviação (QAV) e etanol hidratado como observado na Figura 15 e 16. Em termos energéticos, nesse período, apresentou um crescimento de 1,9% a.a.

Figura 14. Consumo energético no transporte de cargas, por modo, no Brasil. Litros de gasolina equivalente (LGE).



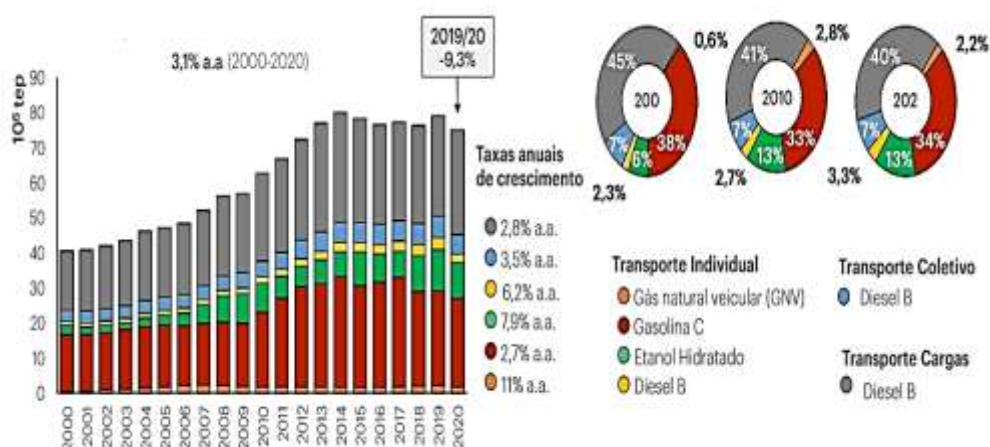
Fonte: IEA, 2021.

Figura 15. Consumo do setor de transportes por fonte de energia (mil tep)



Fonte: EPE, 2022.

Figura 16. Consumo Energético por modo e fonte



Fonte: EPE, 2021.

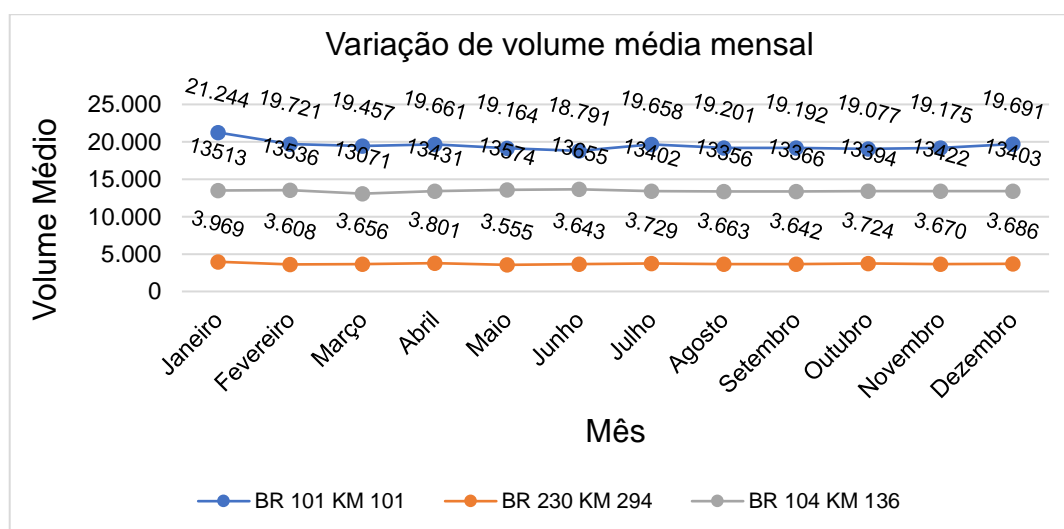
2.5 Frotas de veículos na paraíba

A passagem do veículo em movimento, agregado ao vento natural demonstra uma alternativa de grande potencial para a geração de energia elétrica, limpa e sustentável.

A Paraíba possui 128 rodovias estaduais e 4 federais, onde 12 das estaduais são administradas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, e as outras pelo Departamento de Estradas e Rodagem - DER assim afirma o DNIT (2021).

O desenvolvimento econômico turístico após a década de 70, proporcionou um aumento no tráfego da BR-101, juntamente com a linha costeira, onde se desenvolveu um percurso de passagem de turista que busca a região nordeste. Essa Via é de maior fluxo de veículo do estado como mostrado na Figura 17, assim confirma o DNIT (Contagem, 2019).

Figura 17. Contagem contínua de veículos.

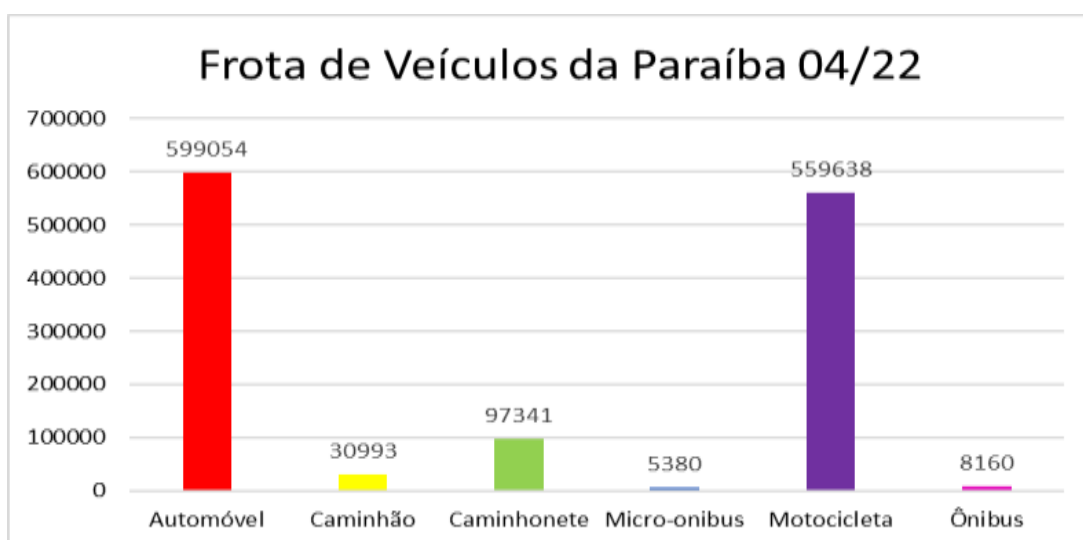


Fonte: PNCT 2022, adaptado.

A Paraíba tem uma frota atual de um pouco mais de 1,3 milhão, conforme dados coletados no Portal Brasileiro de Dados Abertos (Frota, 2022), onde em torno de 52% são automóveis, 44% motos, 3% caminhões e 1% outros, conforme pode ser visualizado na Figura 18.

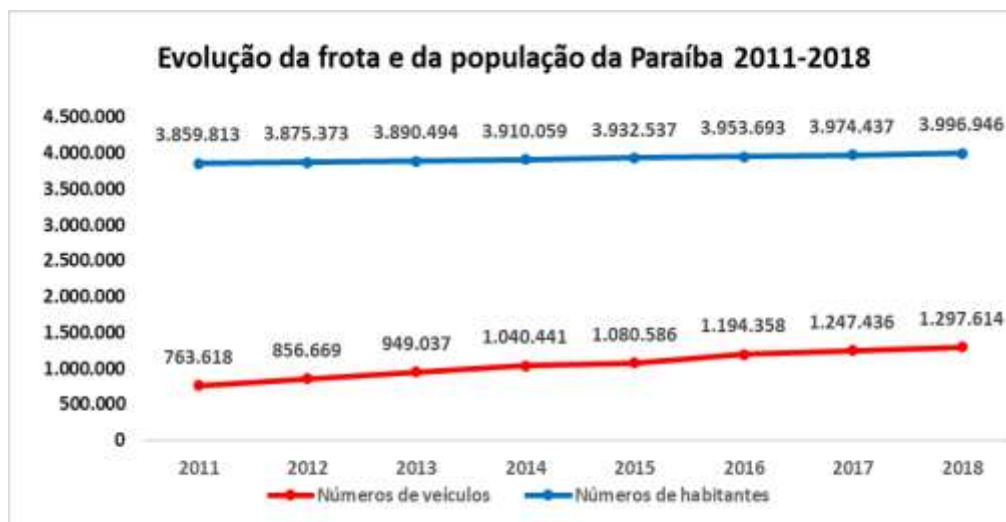
De acordo com dados divulgados pelo IBGE e DETRAN, o crescimento de transporte está sendo superior ao crescimento da população, isso indica que futuramente terá mais frota que pessoas em circulação, como visto na Figura 19. João Pessoa é o município que tem o maior número de frota, seguido de Campina Grande, como ilustrado na Figura 20.

Figura 18. Gráfico da Frota de Veículos da Paraíba.



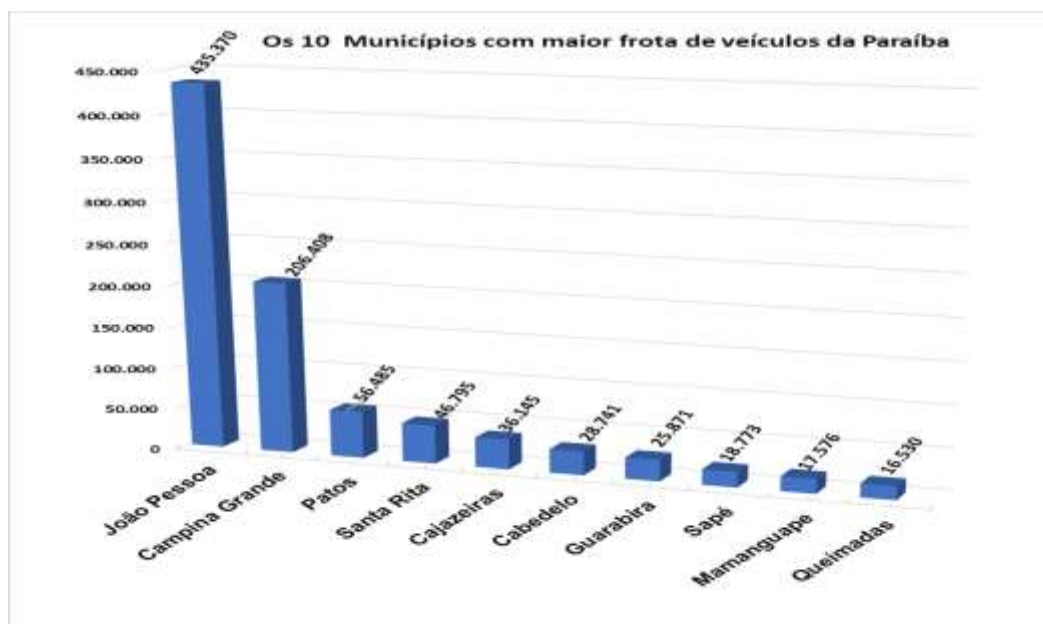
Fonte: FROTA, adaptado 2022.

Figura 19. Evolução da frota e da população da Paraíba 2011-2018.



Fonte: Detran e IBGE 2022, adaptado.

Figura 20. Os 10 Municípios com maior frota de veículos da Paraíba.

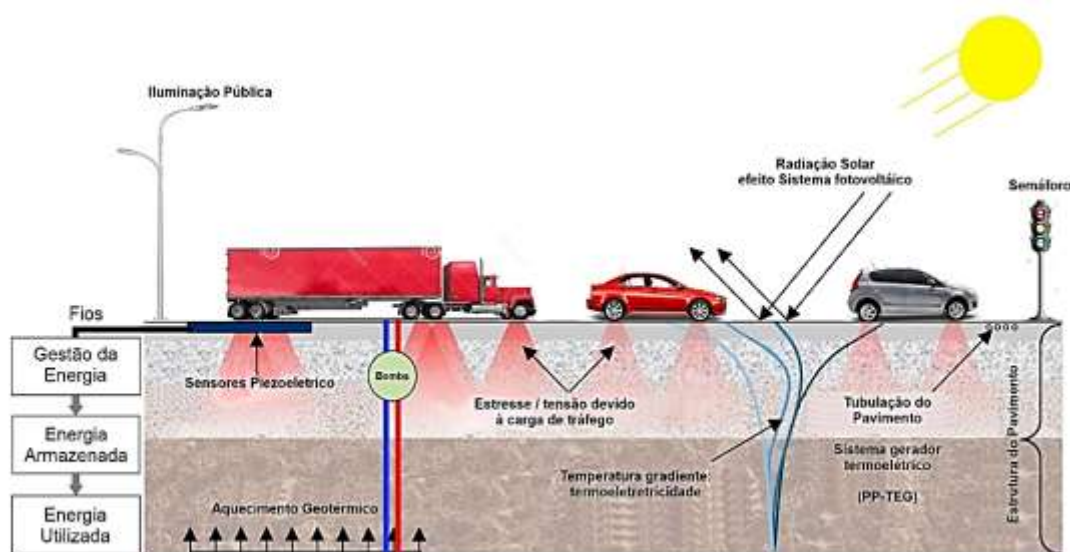


Fonte: Frota, adaptado 2022.

2.6 Métodos e técnicas de captação de energia para aplicações rodoviárias.

Novas técnicas de captação de energias renováveis vêm se desenvolvendo nos últimos anos, com ajuda de tecnologias inovadoras com o intuito de produzir energia limpa e melhorar a sustentabilidade da infraestrutura. Pesquisadores vem se dedicando nos últimos tempos a coletar energia elétrica de diferentes técnicas, como por exemplo, a coleta de energia fotovoltaica, termoelétrica, geotérmica e piezoelétrica como demonstrado na Figura 21 (Wang *et al.*, 2018).

Figura 21. Fontes disponíveis de captação de energia em estrada.



Fonte: Wang, 2018.

Anic *et al.* (2021) citam que existe uma diferença entre captação de energia e as fontes de energias renováveis, onde a captação é feita local e também utilizada localmente e a quantidade de energia gerada é menor.

2.6.1 Captação de energia solar (PV)

A captação de energia através de células fotovoltaica (PV), consiste em converter a radiação solar em eletricidade. Esta técnica de coleta a partir de raios solares é muito relevante no Brasil, tendo em vista que a irradiação solar no país é muito alta (AKBARI *et al.*, 2019).

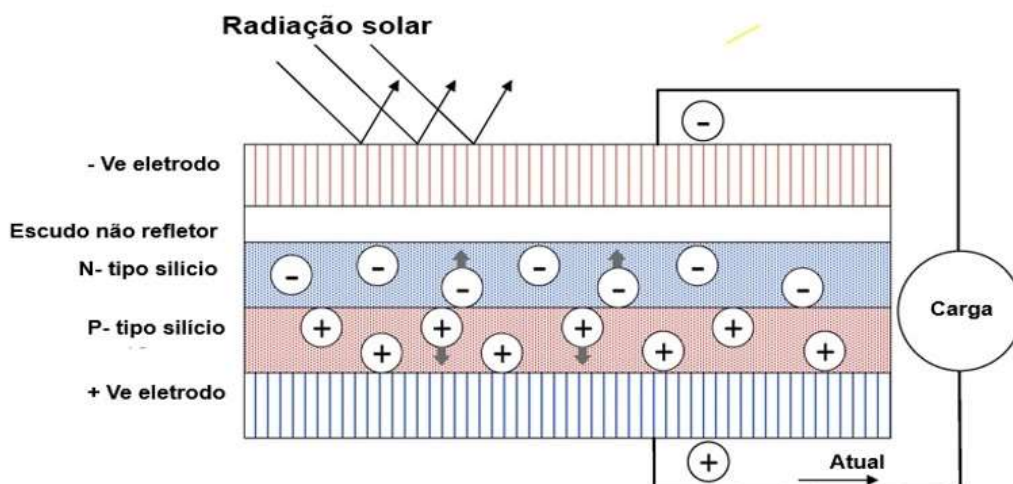
No desenvolvimento do transporte e suas grandes demandas de energias, os pesquisadores começaram a aprofundar os estudos sobre a captação fotovoltaica, utilizando novas tecnologias em estradas e arredores para tal geração (Hu *et al.*, 2022)

O progresso das tecnologias fotovoltaicas tem como referência o crescimento de materiais das células fotovoltaicos, onde foram desenvolvidas em três gerações:

- 1ª geração – à base de bolacha, onde a bateria tipo wafer tem eficiência de conversão e alta estabilidade, mas é relativamente complexo o processo de fabricação.
- 2ª geração – filme fino, nessa geração o processo da bateria é simples e tem custo reduzido. Porém, a comercialização é baixa e algumas matérias primas difíceis de encontrar.
- 3ª geração - materiais orgânicos, onde tem as vantagens de proteção ambiental, alta eficiência e fácil produção industrial.

A célula solar consiste em dois semicondutores, um do tipo P, outro do tipo N. Quando os materiais dos semicondutores das células fotovoltaicas são atingidos pela luz solar, os elétrons livres são coagidos a seguir em uma direção. Os elétrons negativos seguem em direção ao semicondutor do tipo N, já os elétrons positivos seguem em direção ao semicondutor do tipo P, como visto na Figura 22. A movimentação desses elétrons cria uma corrente elétrica quando interligado à carga elétrica.

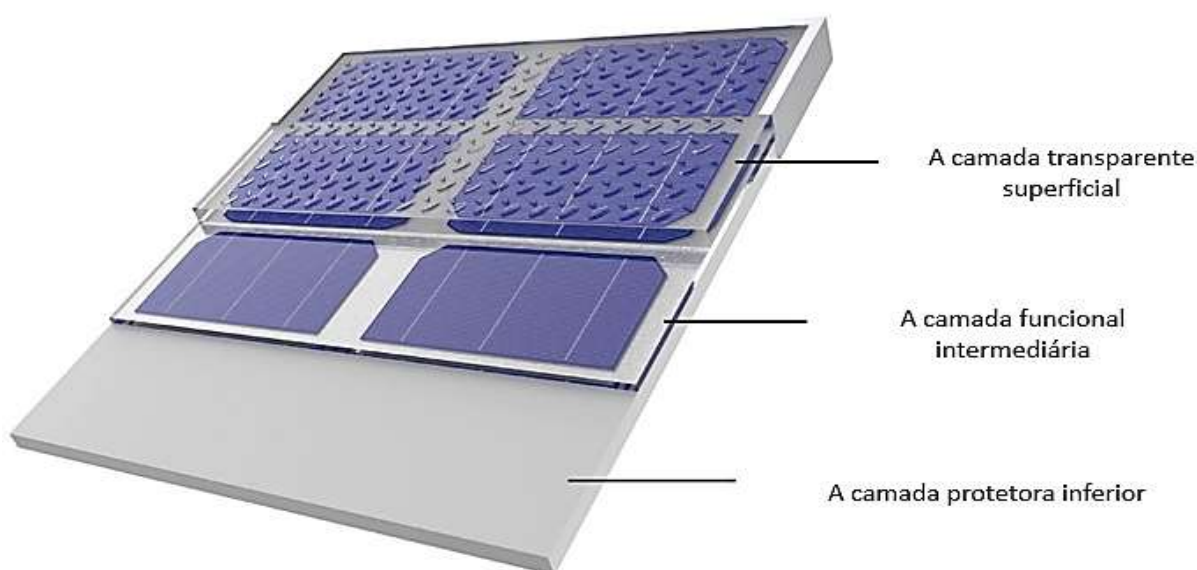
Figura 22. Princípio de funcionamento da célula solar fotovoltaica.



Fonte: Wang, 2018.

O pavimento fotovoltaico, uma tecnologia em crescimento, que combina instalações de pavimentos tradicionais com novas tecnologias de geração de energia fotovoltaica, pode fazer total uso espacial das estradas. A maior parte dos pavimentos fotovoltaicos são desenvolvidos na forma de modularidade. A estrutura básica e comum do módulo é dividida em três camadas, conforme Figura 23 (Li *et al.*, 2023).

Figura 23. A estrutura básica de três camadas do módulo de pavimento fotovoltaico



Fonte: Autor, 2023.

Vários estudos apresentaram uma série de desafios devido às dificuldades em conservar em bom estado diante de várias cargas de tráfegos e mudanças climáticas. A empresa SolaRoad, em 2014, construiu na Holanda, uma ciclovia de 100m com painéis solares onde na camada superior é utilizado vidro temperado de 1 cm. Em um ano a ciclovia chegou a gerar 350 kW h de eletricidade.

A empresa de Colas, em 2015, desenvolveu um novo revestimento fotovoltaico para estradas, que chamou de Wattway, onde era adequado para utilização industrial. Foram consideradas resistentes à derrapagem e ao tráfego, deste modo, poderá ser utilizada futuramente em todos os tipos de infraestrutura rodoviária (Wang *et al.*, 2018).

2.6.2 Captação de energia Termoelétrica

Na captação de energia termoelétrica, se utiliza geradores termoelétricos (TEGs) onde apresenta inúmeros benefícios como: tecnologias de pequeno porte, alta estabilidade, longa vida útil, livre de manutenção entre outros (Fan *et al.*, 2018).

O processo termoelétrico ocorre no momento que os elétrons em um ambiente aquecido se deslocam com o gradiente de temperatura do setor de alta temperatura para o setor de baixa temperatura, resultando em uma aglomeração de carga ou corrente (Wei *et al.*, 2022).

O efeito Seebeck é bastante utilizado na geração de energia termoelétrica, e tem como conceito a criação de um campo magnético quando existe uma variação de temperatura nos dois extremos de um equipamento gerador termoelétrico como mostra a Figura 24 (Wang *et al.*, 2018).

Figura 24. Efeito Seebeck.



Fonte: Wei, 2022.

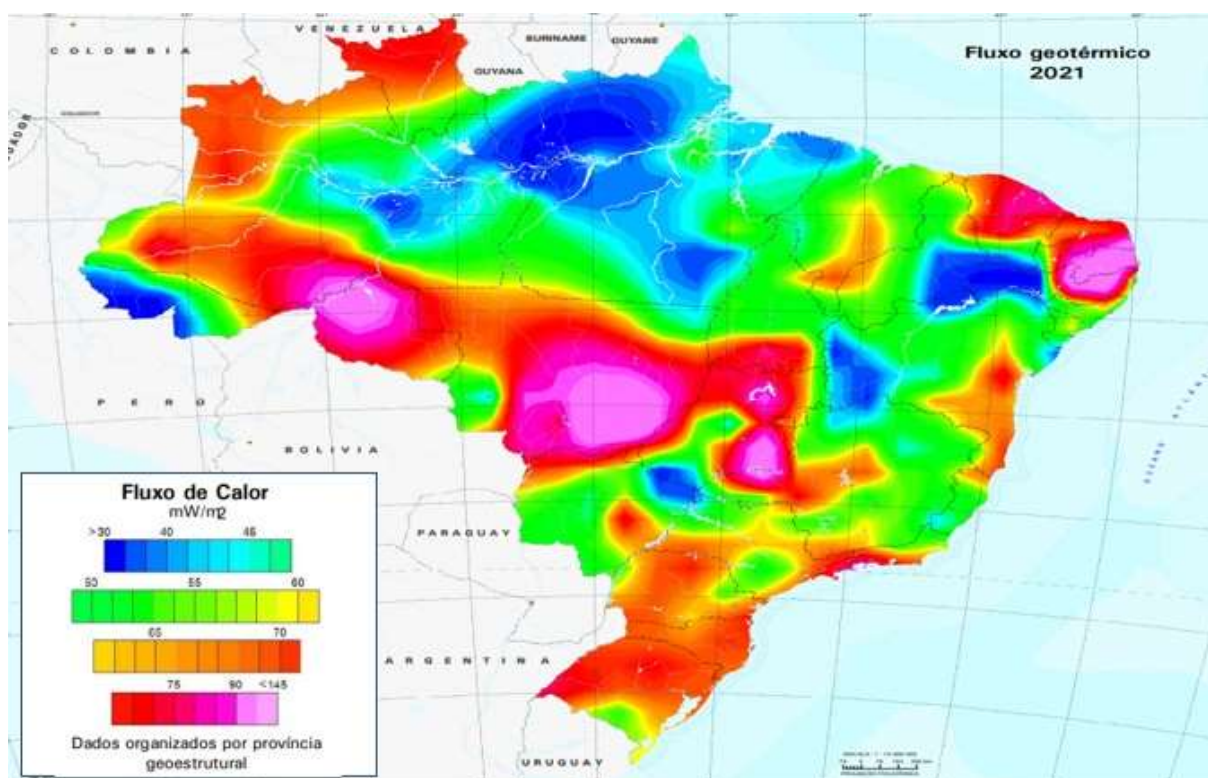
2.6.3 Captação de energia geotérmica.

É uma energia extraída do calor interno da terra, onde chega a atingir 6.000°C. Essa energia calorífica surge através do calor transmitido pelo contato de rochas e águas subterrâneas, surgindo o sistema geotérmico. Pode ser usada para aquecer o pavimento em tempo frio, para derretimento de gelo e neve, abastecimento de água quente para rede doméstica, aquecimento de estufa, balneologia (banhos terapêuticos), geração de eletricidade entre outros (Ahmad *et al.*, 2019).

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é uma ferramenta que integra um conjunto de dados, mapeando o potencial geotérmico de uma região, identificando as áreas promissoras. Esse sistema é flexível para futuras mudanças, acomodando novos dados de acordo com as demandas que surgiram (Elbarbary *et al.*, 2022).

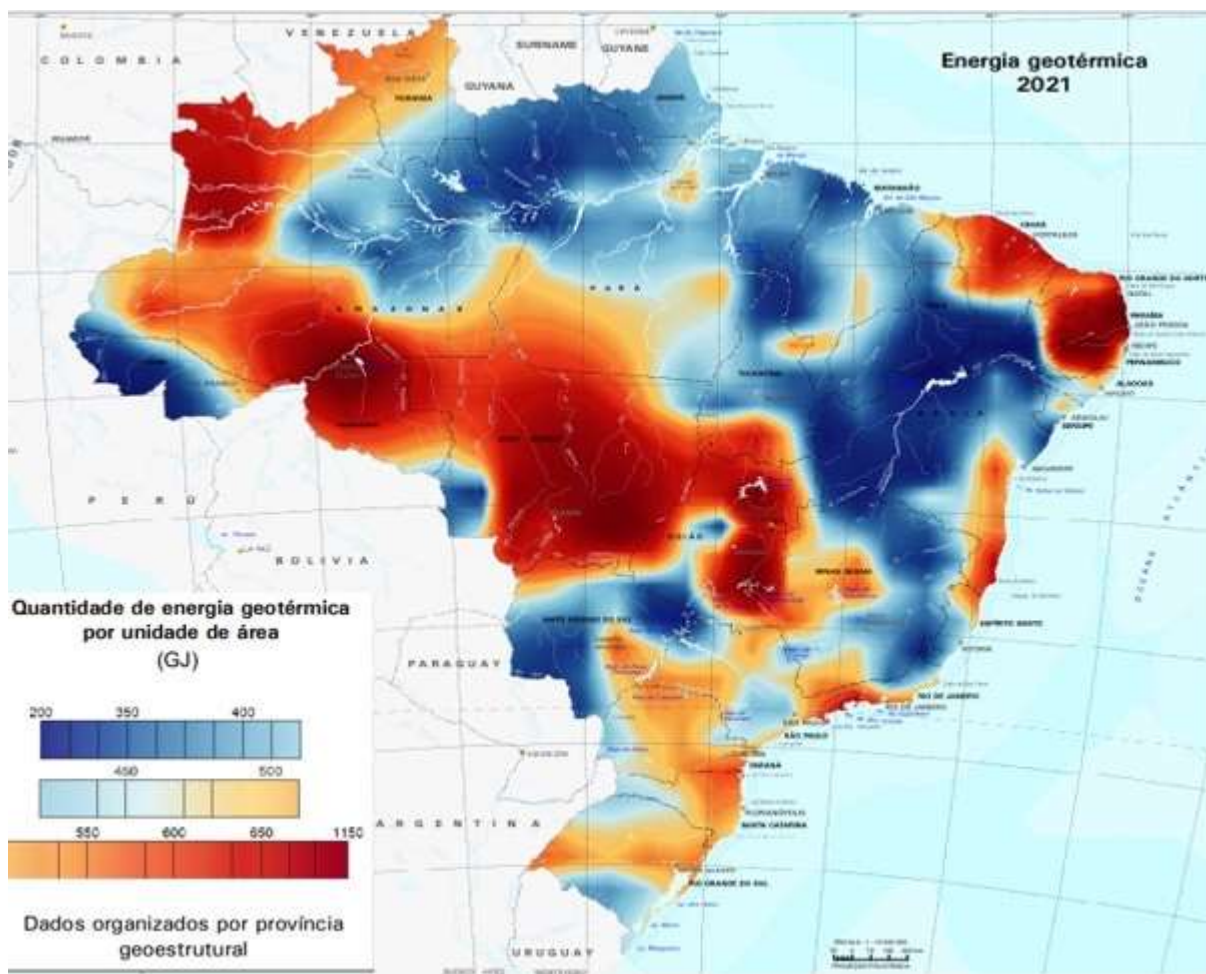
No Brasil existe várias regiões que mostram potencial geotermal, assim ilustra a Figura 25, e as regiões que já produzem essa energia geotérmica como visto na Figura 26.

Figura 25. Mapa do fluxo de calor no território brasileiro.



Fonte: IBGE 2021a, adaptado.

Figura 26. Mapa do fluxo de energia geotérmica no território brasileiro.



Fonte: IBGE 2021b, adaptado.

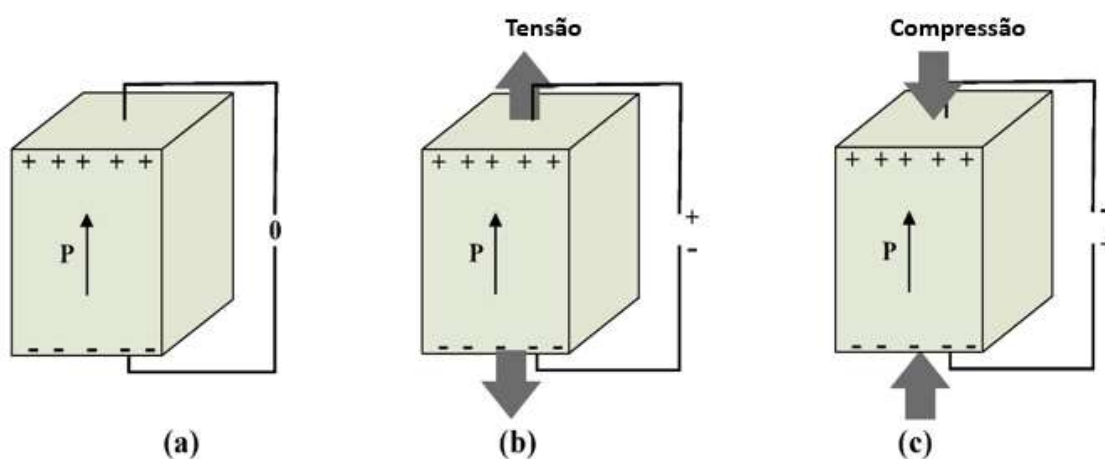
De acordo com A. H. (2008), a energia geotérmica pode ser extraída de três formas:

- Ciclo flash: Os recursos geotérmicos formados por misturas sob alta temperatura e alta pressão fazem parte das fases do vapor flash, onde trazidas a superfície, os geofluidos são dilatados dentro de um separador, surgindo a vaporização de uma parte deles. A turbina delata a vapor para assim gerar energia.
- Ciclo do vapor quente: Esse método aciona uma turbina que impulsiona um gerador, através de um vapor quente extraído de fraturas no solo, eliminando o uso das caldeiras e dos combustíveis fósseis.
- Ciclo do fluido binário: Este ciclo transfere o calor do geofluidos para um fluido orgânico aplicando um trocador de calor e assim a turbina extrai a energia.

2.6.4 Captação de energia piezoelétrica.

As cargas elétricas são produzidas através de esforços mecânicos gerados nos materiais piezoelétricos e essa tensão produzida varia de acordo com o tempo e decorre em uma corrente alternada (CA), provocando o efeito inverso e direto, conforme a Figura 27.

Figura 27. Princípio de funcionamento do efeito piezoelétrico sob (a) tensão zero; (b) tensão; e (c) compressão.



Fonte: Wang, 2018.

Os materiais classificados como piezoelétrico são: piezocerâmicas (PZT), polímeros (PVDF), semicondutores piezoelétricos (ZnO₂), material cristalino único (quartzo), vitrocerâmicas e compósitos piezoelétricos (Ba₂TiSiO₆, Li₂Si₂O₅). Os mais comuns são o de polímeros (materiais flexíveis) e cerâmicos (materiais rígidos), e comparando os dois materiais o polímero geram menos energias que os materiais cerâmicos.

2.7 . Aerogeradores de pequeno porte em rodovias

Dhanasekar *et al.* (2019) destaca que os veículos (de duas ou quatro rodas), enfrentam uma grande quantidade de arrasto de ar durante suas viagens em altas velocidades. Esse arrasto pode ser absorvido por um aerogerador e ser convertido em forma útil. A possibilidade de absorver energia da esteira de ar do veículo em movimento nas rodovias, é um tema significativo.

A velocidade dos veículos nas rodovias é bem maior que a velocidade em centro urbanos, isso indica que a rodovia tem um grande potencial de captação de energia cinética, onde sendo utilizada uma turbina de eixo vertical (VAWTs), que são unidirecionais, poderá surgir resultados promissores (Toudarbari *et al.*, 2021). A velocidade média produzida pelos

veículos nas estradas é em torno de 70 mph, com possibilidade de aumento de acordo com a turbulência da velocidade do vento (Singh *et al.*, 2015).

As turbinas eólicas rodoviárias utilizam o vento produzido pela passagem do carro (energia cinética) em energia mecânica, sequencialmente, o gerador converte em energia elétrica (Balashanmugam *et al.*, 2019). Diferente do fluxo do vento natural, a esteira de vento causada pela movimentação do veículo oferece uma grande turbulência e fluxos de divisão complexas (TIAN *et al.*, 2020).

Um controlador de carga sendo utilizado, poderá produzir uma energia de saída de 12v, onde se pode armazenar em baterias ou abastecer a rede, para ser usada pela sociedade em períodos sem vento ou no futuro quando surgir uma demanda acima do gerado. A energia produzida poderá ser utilizada também em iluminação pública, semáforos, lombadas eletrônicas, entre outros (Kiruba *et al.*, 2021).

O engenheiro Daan Roosegarde desenvolveu um projeto na rodovia N329, na Holanda, que a chamou de *Smart Highway*, onde o objetivo era criar uma rodovia segura, interativa e sustentável e com o apoio da Empresa de Engenharia Heijmans foi desenvolvido. Em 2014 foi inaugurada em 500m da rodovia uma parte do projeto.

O projeto contempla instalação de pequenas turbinas eólicas que imitam flores, representado pela Figura 28, onde usam o vento da passagem do carro em energia e geram luz. Daan Roosegarde confirma que “o governo está apagando os postes de luz à noite para poupar dinheiro porque a energia está sendo convertida em algo muito mais importante do que poderíamos ter imaginado 50 anos atrás” (Constanza, 2014).

Figura 28. Projeto da rodovia Smart Highway na Holanda. Turbinas eólicas que transforma a energia da passagem do veículo em energia. O projeto é chamado de Luz de vento.



Fonte: Gaete, 2014.

A Empresa Alpha 311, cria um projeto inovador de turbina eólica instalada em postes de iluminação para gerar energia para a lâmpada, assim visto na Figura 29 e 30. Essa energia será gerada pela passagem do veículo. Além da iluminação na via, pode ser usada para vender para as concessionárias, abastecer pequenas comunidades entre outros aproveitamentos (ALPHA 311, 2022).

Esse modelo de turbina produz energia elétrica de 100 painéis solares. Serão instaladas no fim do ano em Telford, no Reino Unido, aproximadamente 181 turbinas. Essa instalação irá contribuir para a entrega da meta climática do conselho (Medeiros, 2021).

Figura 29. Primeira implantação mundial de turbinas Alpha 311 para Telford.



Fonte: Alpha 311, 2022.

Figura 30. Funcionamento da turbina Apha311.



Fonte: Alpha 311, 2022.

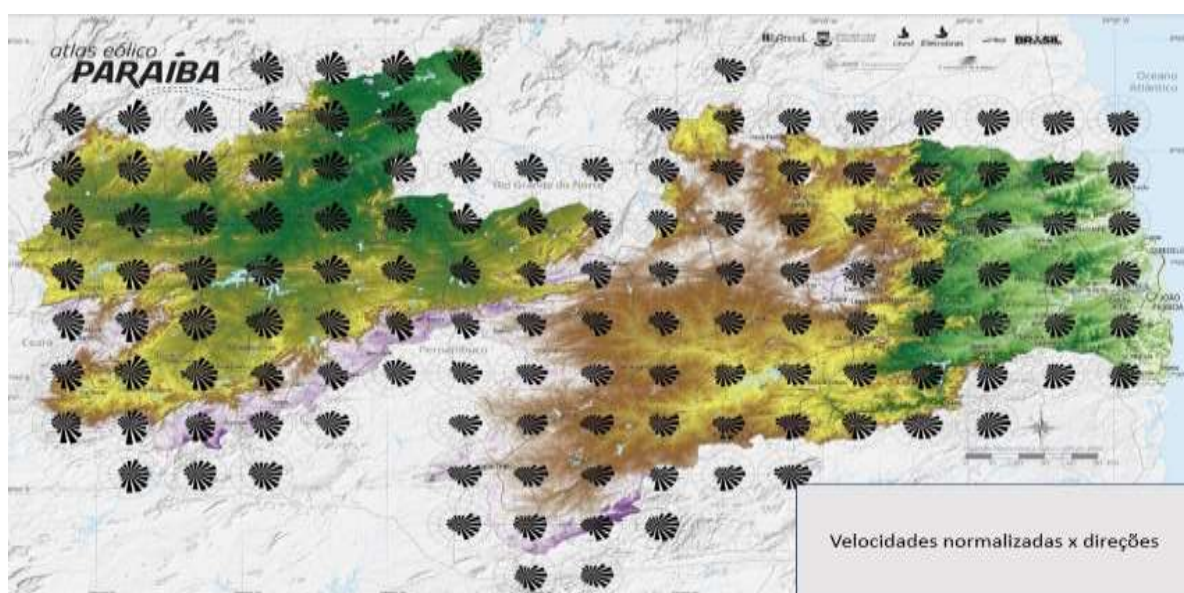
3. ANÁLISE DO VENTO

3.1 Características do clima e vento da Paraíba.

O Estado da Paraíba possui um clima quente onde varia entre 27° a 30° de temperatura, está localizado próximo a linha do equador. O clima varia de tropical úmido, na área litorânea, semi-árido no sertão do estado e nas depressões e serras o clima é semi-úmido. Sua vegetação diversificada é característica da região em razão as suas condições ambientais.

O Atlas eólico (2016b), mostra que o vento predominante no Estado vem do Sudeste, como ilustra a Figura 31.

Figura 31. Levantamento de 15anos da rosa dos ventos anuais.



Fonte: Atlas eólico, adaptado 2023.

O comportamento do vento é influenciado pela topografia da região, por razão do seu relevo acidentado. Os ventos se apresentam com mais intensidade nos meses de junho a setembro, em destaque nos meses de agosto e setembro (Lopes, 2022).

3.2 Análise analítica

3.2.1 Potência extraída do vento

A energia eólica está cada vez mais presente na contribuição energética global estimulada cada vez mais pelos avanços tecnológicos e sua redução de custo de instalação. Ela

é dada pela transformação da energia cinética (usando a Equação 1) criada pela movimentação da massa de ar em energia eólica (Duarte Jacondino *et al.*, 2021).

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

onde, E_c é a energia cinética, m a massa do corpo e v a velocidade do corpo.

De acordo com a Equação 1, a energia cinética aumenta com o quadrado da velocidade do vento. Se a velocidade do vento for observada num determinado intervalo do vento, tem-se a potência do vento. Para estimar a medição da potência do vento baseada em uma área que as pás entrarão em contato com vento para gerar energia eólica, substitui m (fluxo de massa de ar) presente na Equação 1 por ρAv , obtendo a seguinte Equação (2):

$$P_V = \frac{\rho Av^3}{2} \quad (2)$$

Onde P a potência disponível do vento, ρ é a massa específica do ar, A é a área de seção transversal do cilindro que é ultrapassada pelo vento e v é a velocidade do vento, assim foi obtido o valor da potência que deverá ser gerada pelas pás das turbinas na área desejada (Rezende, 2015).

A potência pode ser expressa em função da área, que é a densidade de potência que o vento disponibiliza em dada área A , conforme a Equação 3.

$$\frac{P_V}{A} = \frac{\rho v^3}{2} \quad (3)$$

Considerando a passagem do ar através de uma seção circular que possui um diâmetro D e a área do círculo é $\pi D^2/4$, a equação que determina a potência do vento é:

$$P_V = \frac{\pi}{8} \rho v^3 D^2 \quad (4)$$

Baseado na equação de Clapeyron, a equação de um gás ideal, é possível determinar a massa específica do ar com a temperatura do ambiente, T , e a pressão atmosférica, P_a :

$$\rho = \frac{Pa}{RT} \quad (5)$$

onde R é a constante universal dos gases perfeitos ($R_{ar} = 287 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$).

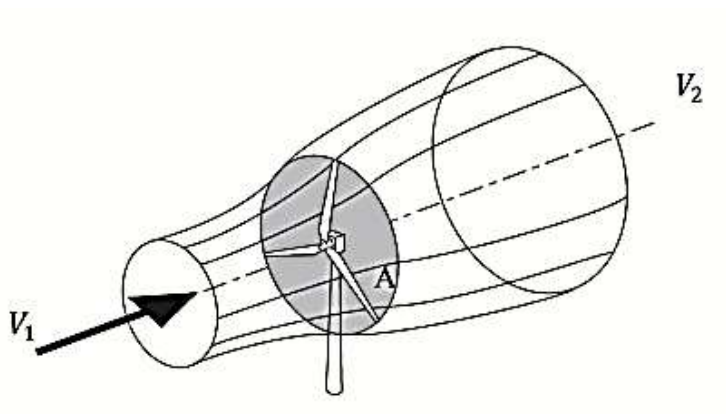
3.2.2 Rendimento de Betz

A maior potência atingível em uma turbina eólica é um dos aspectos mais importante no que se refere à energia eólica, onde isso foi possível pela Lei de Betz.

De acordo com Dalmaz (2007) o tubo de corrente de ar no V1 e V2 não haverá alteração de massa, conforme, Figura 32, todavia, ao passar das pás, acontecerá uma considerável perda de pressão, que logo atingirá o valor original ao passar da turbina eólica. Assim sendo, temos a Equação 6:

$$p_1 = p_2 \quad (5)$$

Figura 32. Fluxo de ar de uma turbina eólica em funcionamento.



Fonte: Lima, adaptado 2015.

A potência que deverá ser extraída do vento através de uma turbina está representada pela Equação 7:

$$P_{Ex} = FV_T \quad (7)$$

onde F é a força exercida pelo vento na turbina e V_T a velocidade do vento na turbina.

O vento atua uma força na turbina, onde se resulta na diferença de pressões, conforme Equação 8:

$$F = (p_M - p_J)A_T \quad (8)$$

onde o valor da diferença das pressões deverá levar em consideração os fluidos não viscosos, sem velocidade e incompressíveis e A_T será a área varrida pelo rotor (Zhang,2022). Assim sendo, aplica-se a equação de Bernoulli, onde da região 1 para a montante do rotor, tem-se:

$$p_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = p_M + \frac{\rho V_M^2}{2} \quad (9)$$

e da região 2 para a jusante do rotor, tem-se:

$$p_1 + \frac{\rho V_J^2}{2} = p_M + \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (10)$$

e, aceitando $V_M = V_J = V_T$

$$(p_M - p_J) = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2) \quad (11)$$

fazendo a substituição da equação 11 na 8, tem-se:

$$F = \frac{1}{2} \rho A_T (V_1^2 - V_2^2) \quad (12)$$

logo, substituindo na equação 7:

$$P_{Ex} = \frac{1}{2} \rho A_T V_T (V_1^2 - V_2^2) \alpha \quad (13)$$

Atuando como um bloqueador do fluxo, a turbina interfere no fluxo de ar, desse modo o V_T , velocidade do vento da turbina, não se iguala ao V_1 , velocidade do vento incidente.

A Equação 14, representa essa resultante, α , coeficiente de velocidade, demonstra o valor da velocidade do vento, que não atinge as pás da turbina.

$$\alpha = \frac{V_1 - V_T}{V_1} \quad (14)$$

Já para encontrar o valor da velocidade do vento da turbina eólica, usa-se:

$$V_T = V_1(1 - \alpha) \quad (15)$$

Considerando que o tubo de corrente está representado como a seção (1), entrada e seção (2), saída, temos como calcular a força do aerogerador de acordo com a variação de movimentos entre elas.

$$F = m(V_1 - V_2) \quad (16)$$

Sendo V_T a velocidade do ar que percorre o aerogerador, tem-se:

$$F = \rho A_T V_T (V_1 - V_2) \quad (17)$$

Equiparando a Eq. 12 e 17, tem-se a média da velocidade do vento da entrada e da saída na turbina.

$$V_T = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (18)$$

Substituindo a Eq. 15 na 18, obtém-se:

$$V_2 = V_1(1 - 2\alpha) \quad (19)$$

A turbina afeta consideravelmente a passagem do vento. Pode-se observar que quanto maior for α , coeficiente de velocidade induzida, maior será o bloqueio da turbina no fluxo de vento, assim sendo, V_T e V_2 são reduzidos. Isso interfere na potência extraída, uma vez que V_2 diminui, V_T também diminuirá, esse efeito é observado na equação 18, logo, entende-se que a energia cinética tem um valor máximo limite que o aerogerador consegue extrair da velocidade do vento.

Por definição, o coeficiente de potência (C_p) é dado por:

$$C_p = \frac{P_{EX}}{P_V} \quad (20)$$

Na qual P_{EX} é potência extraída do vento pela turbina e P_V a potência disponível no vento

Fazendo uma substituição das equações V_T e V_2 , na Eq 13, pelas Eq 15 e 19, chega-se:

$$P_{Ex} = 2 \rho \alpha A_T V_1^3 (1 - \alpha)^2 \quad (21)$$

Como também substituindo as Eq 2 e 21, na Eq 20, tem-se:

$$C_p = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (22)$$

A Lei de Betz conclui um conceito que a conversão máxima da energia cinética obtida no vento em energia mecânica através de uma turbina eólica não poderá ser superior a 59,3%. Portanto, a energia eólica gerada é inferior à capacidade total da potência do vento. Esta Lei encena a passagem de ar pela turbina, onde sua velocidade de entrada é maior que a velocidade de saída, isso ocorre pelo aumento da área transversal do fluxo de ar, como mostra a Figura 28 (Zhang, 2022).

Assim sendo, o máximo de potência a ser extraída do vento através de uma turbina eólica é:

$$\frac{P}{A} = \frac{\rho v^3}{2} c_{p,Betz} \quad (23)$$

Onde $c_{p,Betz}$ é o coeficiente da potência de Betz e seu rendimento máximo é $\frac{16}{27} = 0,593$. Essa será a máxima potência teoricamente aproveitável, assim sendo temos a equação:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 (0,593) \quad (22)$$

3.2.3 Distribuição Estatística de Weibull

A densidade da energia eólica é um indicador de grande importância que determina o potencial eólico como também o quantitativo de energia eólica de acordo com a variação de velocidade do vento, além de ser um fator necessário para qualificar as qualidades das turbinas eólicas.

A densidade da energia pode ser calculada através de uma função de distribuição de probabilidade como a de Weibull, onde tem como principal vantagem aspectos necessários que se ajusta com os dados obtidos da velocidade do vento (Mohammadi *et al.*, 2016).

A distribuição de Weibull tem sido bastante utilizada para especificar comportamento do vento e utilizando V_0 , temos a Equação:

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V-V_0}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V-V_0}{c}\right)^k\right] \quad (23)$$

onde V é a velocidade do vento; k é o parâmetro de forma e c é o parâmetro da escala com a mesma proporção da velocidade do vento.

E admitindo $V_0 = 0$, chega-se a:

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (24)$$

O $f(V)$ será o valor de número de vezes atingida no período de V e $V + dv$. O parâmetro de forma k , define como irá ser representada a curva da distribuição de Weibull e utiliza, normalmente, os valores entre 1,5 e 3. A equação 24 demonstra a forma de cálculo para identificar k .

$$k = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1,086} \quad (25)$$

Onde,

v = Velocidade média do vento no período adotado;

σ = Desvio padrão da velocidade do vento;

k = Fator de forma;

O parâmetro c indica o perfil da distribuição e utiliza a mesma unidade de medida da velocidade, m/s (Chang,2011).

$$c = \frac{v}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (26)$$

Onde,

v = Velocidade média do vento no período adotado;

Γ = Função de gama;

k = Fator de forma;

c = Fator de escala (m/s).

Os parâmetros c e k são indispensáveis na maioria das distribuições, alcançados os resultados, é possível definir analiticamente as constâncias de distribuição do vento por meio da função de densidade de probabilidade de Weibull.

A função cumulativa de Weibull se dá:

$$F(u) = \int_0^v f(t)dV \rightarrow 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (27)$$

Os valores menores que V são representados por $F(V)$, onde o intervalo de tempo é obtido multiplicando pelo número de horas de dados de vento, e substituindo na Eq 24 o V , utilizando o valor máximo da velocidade, resultará em $F(V) = 1$, obtendo assim 100% de dados da menor velocidade (Ramirez, 2005).

Outra característica essencial a ser considerada em distribuições eólicas é a densidade de potência média. O que determina diretamente esta densidade é o um fluxo de ar por meio de uma unidade de área normal ao fluxo, usando a equação:

$$P(u) = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (28)$$

Onde, u é a velocidade instantânea e ρ a densidade do ar. A densidade do ar é modificada de acordo com a alteração de pressão, umidade e temperatura. Se multiplicarmos a densidade de

energia eólica das respectivas velocidades do vento com a probabilidade das mesmas, encontra-se a distribuição de energia eólica de cada velocidade do vento (Gabriel Filho, 2011).

Estimar a densidade de potência média anual de energia eólica é uma forma produtiva de qualificar os recursos eólicos disponíveis na zona potencial. Assim, pode ser determinada por meio da equação a seguir.

$$P_{med} = \frac{1}{2} \rho \int_0^{+\infty} V^3 f(V) dV \quad (29)$$

4. MATERIAL E MÉTODOS

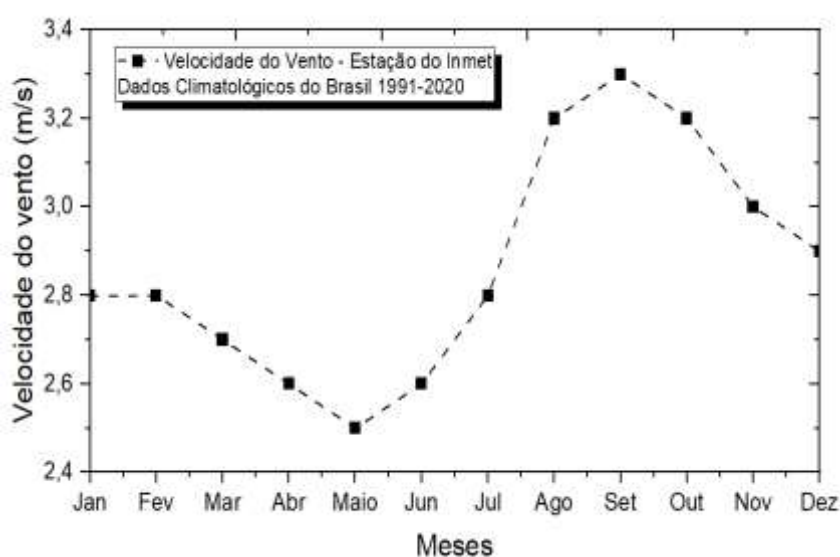
A metodologia utilizada neste trabalho foi caracterizada pelo estudo experimental da medição do fluxo de ar resultante das passagens dos veículos por meio de um levantamento de dados coletados por anemômetros para estimar as potências da zona geográfica analisada.

4.1 Levantamento da central meteorológica

A cidade do Conde, está situada no litoral sul da Paraíba, na área da grande João Pessoa, Região Nordeste, possui 2172 km² de área territorial. É uma cidade litorânea com clima tropical úmido. As temperaturas são altas, de 21° na estação fria e temperaturas de 31° na estação quente.

A Figura 33 mostra os dados de velocidade média do vento da cidade de João Pessoa, nos períodos de janeiro/1991 até dezembro/2020. As informações estão disponíveis no site do INMET. A média de velocidade foi de 2,87 m/s. As Figuras 34 e 35 mostram a velocidade do vento no ano de 2022 e 2023, respectivamente, com média anual inferior a 2 m/s. Esses últimos períodos coincidem com os testes experimentais realizados na rodovia, o que ajuda na análise do efeito da passagem dos veículos na intensidade do vento.

Figura 33. A média de velocidade do vento entre 1991 e 2020 na cidade de João Pessoa.



Fonte: INMET, 2024.

Figura 34. A velocidade do vento no ano de 2022 na cidade de João Pessoa.

Fonte: INMET, 2024.

Figura 35. A velocidade do vento no ano de 2023 na cidade de João Pessoa.

Fonte: INMET, 2024.

Uma vez que a velocidade média do vento na altitude a qual a estação coleta os dados na altura de 7,43 m, de acordo com o INMET, os dados foram extrapolados para 0,5 m, 1 e 1,

5 m de altitude, utilizando a Lei de Prandtl com o objetivo de avaliar a densidade de potência disponível em outras altitudes, onde na prática, é posta com a equação:

$$\frac{u_z}{u_r} = \frac{\ln\left(\frac{h_z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_r}{z_0}\right)} \quad (30)$$

onde,

u_z velocidade média do vento da altura proposta;

u_r velocidade média do vento da altura de referência;

h_z altura referência

h_r altura proposta

z_0 define por comprimento característico da rugosidade do solo.

Dessa forma se obtém a extrapolação para alturas diversas, tendo uma altura como referência, onde na prática é utilizada as características de rugosidade da Figura 36:

Figura 36. Valores típicos do comprimento característico da rugosidade do solo h_0

Tipo de Terreno	h_0 (m) Mínimo	h_0 (m) Máximo
Lama/gelo	10^{-5}	$3 \cdot 10^{-5}$
Mar calmo	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Areia	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
Neve	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-3}$
Campo de cereais	10^{-3}	10^{-2}
Relva baixa/stepes	10^{-2}	$4 \cdot 10^{-2}$
Descampados	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Relva alta	$4 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}
Terreno com árvores	10^{-1}	$3 \cdot 10^{-1}$
Floresta	10^{-1}	1
Povoação dos subúrbios	1	2
Centro da cidade	1	4

Fonte: Gabriel, 2011.

Na zona geográfica escolhida tem predominância de árvores, assim, adotou-se a classificação “terreno com árvores”, conforme as características do ambiente. A distribuição de Weibull foi utilizada para se obter uma distribuição probabilística da velocidade do vento para as alturas 0,50 m, 1 m e 1,5 m, utilizando a eq. (27).

4.2 Metodologia experimental

4.2.1 Planejamento

O planejamento iniciou com a busca da zona geográfica com a probabilidade de potencial eólico no estado da Paraíba. Logo após, foi feito levantamento da rodovia de maior movimentação de veículos através de dados disponíveis no site oficial do DNIT. Fazendo comparativo das Rodovias federais que cruzam o estado, a Rodovia BR 101 se destacou das demais pela grande movimentação de veículos, como mostrado na Figura 17.

Em sequência, se definiu a zona de medição, com os seguintes critérios: velocidade máxima permitida, livre de empecilhos (sem faixa de pedestre, lombada, giradores, semáforos etc.), via ampla e plana. O km 101 com velocidade máxima de 100 Km/h demonstrou características compatíveis aos critérios adotados.

Para coletar a velocidade do vento se utilizou anemômetros, como utilizados nos trabalhos de Cardoso, 2018; AL-Alquel *et al.*, 2016; Bani-Hani *et al.*, 2018, que nortearam essa dissertação. Foram utilizados aparelhos digitais pela completa informação de dados obtidos, onde foram escolhidos de acordo com suas funções e habilidades. A comunicação com o computador é feita através de softwares e cabo USB.

Foram utilizados três aparelhos para coleta de dados, onde a instituição disponibilizou um, o modelo Minipa MDA, conforme verba disponível e dois do modelo Btmetre BT-866^a, que foram adquiridos pelo autor, com recurso próprio.

Um notebook foi utilizado para aquisição dos dados enviados pelos anemômetros através dos softwares, como também para gravação de toda a movimentação da via durante o experimento. Uma base de fixação dos aparelhos foi desenvolvida para melhor estabilidade no momento da coleta.

4.2.2 Zona Geográfica

A zona geográfica escolhida para medição da velocidade do vento foi a BR 101 km 101, Avenida Paraíba, Cidade do Conde, Zona 4, Latitude:-7.231717 e Longitude:-34.922598, com velocidade máxima de 100 Km/h, como apresenta a Figura 37. Localizada na Mata Paraibana, caracterizado com um clima tropical (quente e úmido) e aproximadamente a 20 km da costa marítima, a Br 101 Km 101 tem ventos predominantes do Sudeste (SE) variando no Leste-Sudeste (ESE). Essa via é a de maior movimentação do Estado, como indica os dados na Figura 17, logo, demonstra possibilidade de potencial eólico pelo grande tráfego de veículos.

Figura 37. Localização geográfica da zona de medição: Avenida Paraíba, Zona 4, BR.



Fonte: Maps/Autora 2022.

4.2.3 Setup e validação de ensaio

Para coleta de dados, foram utilizados quatro anemômetros digitais, um como referência e os outros que foram operados na pesquisa, ilustrados na Figura 38 e 39. Os anemômetros registraram velocidade do vento (m/s), umidade do ar (%) e a temperatura (°C).

Entre as exigências gerais, a MEASNET (2020) indica que todos os transdutores deverão ser convalidados, para confiabilidade nos resultados, assim, foi realizado para verificação dos aparelhos como apresenta a Figura 40.

A validação foi realizada fixando os aparelhos na mesma base, um ao lado do outro, obedecendo mesma altura e ângulo. As coletas de dados foram iniciadas simultaneamente, registrando de 1 em 1 segundo, através dos softwares, por um tempo estimado de 45 minutos. Na Figura 39 é possível visualizar o gráfico da convalidação dos anemômetros em relação ao anemômetro de referência. A convalidação do Setup por comparação apresenta convergência satisfatória entre os quatro aparelhos com erros mínimos.

Figura 38. Anemômetro Btmeter BT-866^a



Fonte: Btmeter-store, 2023.

**CARACTERÍSTICA DO APARELHO
BT-866A**

Velocidade do vento: 0,3 ~ 40 m/s

Temperatura do vento: -10~45°C

Volume do vento: 0,001 ~ 9999 x 100

Umidade relativa: 5 ~ 95%

Precisão de $\pm 3\%$

Comunicação: Interface USB

Data Logger

Figura 39. Anemômetro Minipa MDA-20.



Fonte: Minipa, 2023.

**CARACTERÍSTICA DO
APARELHO MDA20**

Velocidade do vento: 2 ~ 30m/s

Temperatura do vento: 0~ 40°C

Volume do vento: 0,001 ~ 9999 x 100

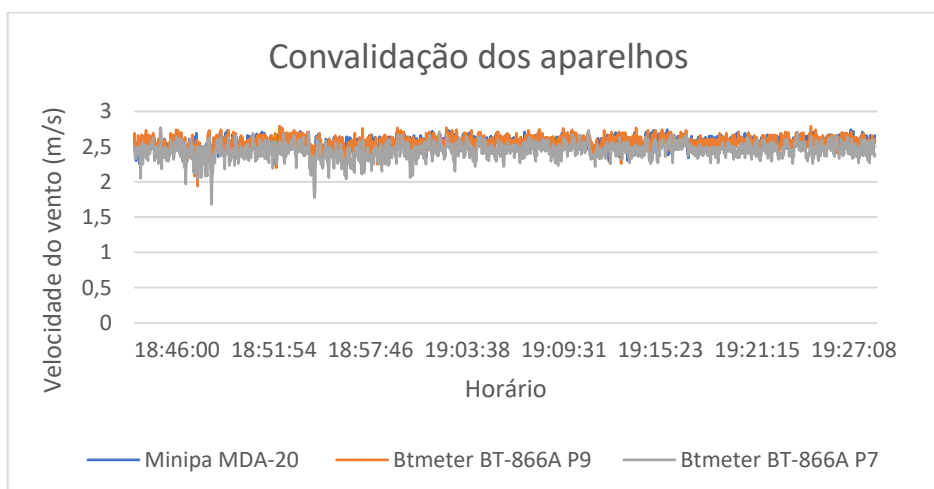
Umidade relativa: 0 ~ 75%

Precisão de $\pm 3\%$

Comunicação: Interface USB

Data Logger

Figura 40. Convalidação dos aparelhos.



Fonte: Autora 2022.

4.3 Primeira coleta de dados

4.3.1 Aparato Experimental

As coletas de dados foram realizadas *in loco*, por meio de um aparato experimental para fixação dos aparelhos, onde foi desenvolvida uma base de material ferro galvanizado com 2,70 m de altura e um braço de força para proporcionar estabilidade, ambos foram firmados no solo, como ilustrado na Figura 41.

Na base foram feitos pontos de regulações de altura para fixação dos aparelhos a cada 0,25 m para melhor manuseio dos anemômetros.

O notebook foi utilizado para capturar imagens durante o período da amostragem e para funcionamento dos softwares indicados para o registro dos dispositivos onde a conexão foi feita através de um cabo USB.

Figura 41. Aparato experimental da primeira coleta de dados. Ângulo de 0°, 45° e 90°, distância de 0,50 m, 1m e 1,5 m e altura de 0,50 m, 1 m, 1,5 m.



Fonte: Autora 2022.

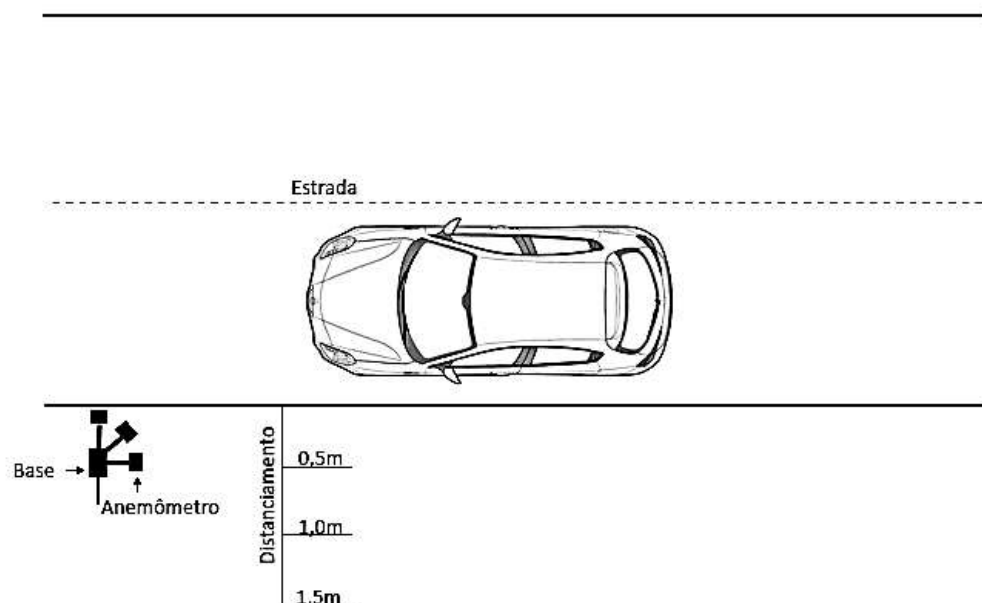
4.3.2 Coleta de Dados

A amostragem ocorreu nos meses de setembro e outubro do ano de 2022 em dias alternados das 8h às 17h em dias alternados, a temperatura oscilou entre 29° a 32° graus Celsius, dia ensolarado. A umidade do ar em média de 82% e a velocidade do vento chegou a atingir 10 km/h, assim registra o INMET (2023).

Os anemômetros foram posicionados em três alturas do solo, 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m, como também diferentes distâncias, 0,50 m, 1 m e 1,5 m a partir do meio fio. Também foram utilizadas direções alternadas para verificar o melhor cenário de captação de fluxo de ar, 0°, 45° e 90° em relação a estrada, como demonstrado na Figura 42, e assim, identificar o maior vento turbulento impelido pela passagem do veículo nesses posicionamentos.

O perfil de posicionamento dos aparelhos se justifica pela semelhança com o trabalho realizado por Bani-Hani (2018), Al-Alquel (2016) e Raheem (2020).

Figura 42. As orientações utilizadas para primeira coleta de dados com os anemômetros.



Fonte: Autora 2022.

O tempo de aquisição de dados para cada configuração estudada foi de 1 segundo com permanência de 45 min, tendo em vista o tempo médio em concordância a literatura (Cardoso, 2018; AL-Alquel *et al.*, 2016; Bani-Hani *et al.*, 2018).

A câmera do notebook foi utilizada para registrar a passagem de veículos durante os testes experimentais, com o objetivo de, posteriormente, relacionar o resultado da medição da velocidade do vento com a movimentação da via.

4.4 Segunda coleta de dados

4.4.1 Aparato experimental

A coleta de dados foi realizada a partir da análise das melhores médias da primeira amostragem, onde se destacou a altura de 0,50 m como predominante, assim sendo, utilizou a melhor performance como altura padrão, alterando apenas os ângulos, 0°, 45° e 90° e o distanciamento, 0,50 m, 1 m e 1,5 m, como mostra a Figura 43.

Figura 43. Aparato experimental da segunda coleta de dados. Ângulo de 0°, 45° e 90°, distância de 0,50 m, 1m e 1,5 m e altura de 0,50 m.



Fonte: Autora 2023.

Foram utilizadas três barras de galvanizado e fixados os anemômetros individualmente. O notebook foi utilizado para captura de imagens no momento da coleta para registro da movimentação da via.

4.4.2 Coleta de dados

A amostragem foi realizada no mês de maio de 2023 das 8hr às 17hr. A temperatura oscilou de 27° a 29° graus Celsius com céu nublado e pancadas de chuvas. A umidade chegou a 85% e a velocidade do vento máxima atingida foi de 7 km/h, conforme dados do INMET (2023).

Os três anemômetros foram fixados na altura de 0,50 m a partir do solo, coletando dados simultaneamente. Foram instalados nas distâncias de 0,50 m, 1 m e 1,5 m tendo como referência o meio fio. Também foram posicionados em ângulos diferentes, 0°, 45° e 90° graus.

Como padrão, a coleta de dados teve permanência de 45 min onde os registros foram feitos a cada 1 segundo, através dos softwares.

4.5 Terceira coleta de dados

4.5.1 Aparato Experimental

O terceiro experimento foi realizado utilizando os mesmos parâmetros da segunda coleta de dados. Foram posicionados nos três ângulos, 0°, 45° e 90°, prevalecendo a altura de 0,50m e o distanciamento de 0,50 m, 1 m, 1,5 m, como mostra a Figura 44.

Figura 44. Aparato experimental da terceira coleta de dados. Ângulo de 0°, 45° e 90°, distância de 0,50 m, 1m e 1,5 m e altura de 0,50 m.



Fonte: Autora, 2023.

Foram utilizadas três barras de galvanizado, onde os anemômetros foram fixados individualmente nas alturas, ângulos e distância estabelecidos. Como padrão, a câmera do notebook foi utilizada para registrar a movimentação da via.

4.5.2 Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada no mês de agosto de 2023 das 8hr às 17hr. A temperatura oscilava de 29° a 31° graus Celsius, dia ensolarado, a umidade 84% e a velocidade do vento máxima atingida foi de 6 km/h, conforme dados do INMET (2023).

Foram utilizados três anemômetros fixados na altura de 0,50 m, coletando dados simultaneamente nos ângulos de 0°, 45° e 90° e nas distâncias de 0,50 m, 1 m e 1,5 m tendo como referência o meio fio. Duração média da amostragem foi 45 min e os registros a cada 1 segundo.

4.6 Processamento e tratamento dos dados

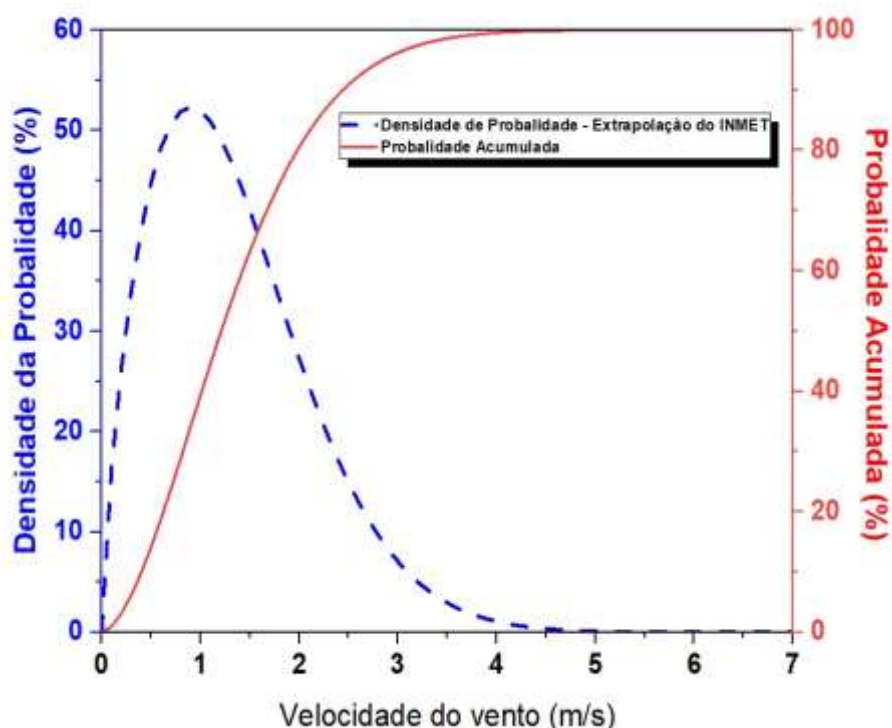
De acordo com os dados da amostragem no período aproximado de 45 min, uma nova planilha era gerada com os dados coletados.

Após as amostragens, as planilhas foram unificadas, de acordo com altura, distanciamento e ângulo, assim, tornou mais prática a análise de dados

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foi realizado a adequação da série de dados para a distribuição de Weibull em que foram obtidas algumas variáveis. A Figura 45 mostra a função de Weibull para a cidade de João Pessoa, entre 1991 e 2022, para alturas extrapoladas. É possível observar que com o aumento da altura a ocorrência da velocidade média diminui. Para uma altura de 0,5 m, a velocidade média tem 30,6%, enquanto para 1,5 m tem probabilidade de 28,4%. Apesar da diminuição da regularidade, o fator de forma para todas as alturas é o mesmo: $k = 1,7$.

Figura 45. Função de Weibull para a cidade de João Pessoa, entre 1991 e 2022.

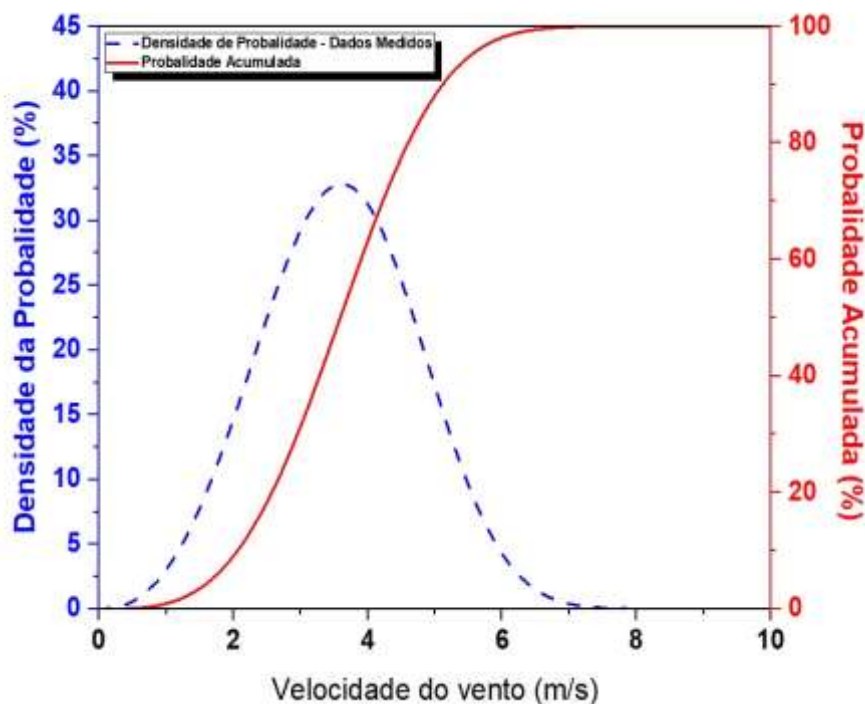


Fonte: Autora 2024.

O aumento da altura também implica no aumento do fator de escala, ou seja, aumento da velocidade com maior ocorrência. O c_v varia de 2,5 a 2,8.

A Figura 46 mostra a função de Weibull para os dados obtidos na rodovia no período de setembro a outubro de 2022. A ocorrência da velocidade média é de 32,8%. Pode-se notar que a velocidade média é mais alta quando comparados aos dados extrapolados do INMET, o que comprova a influência das esteiras de ar causadas pelas passagens de veículos na rodovia.

Figura 46. Função de Weibull para os dados obtidos na rodovia.



Fonte: Autora 2024.

Vale ressaltar que foram coletados dados em 42 posicionamentos, onde permaneceram por 45 min aproximadamente e a cada segundo se registrava uma nova coleta, totalizando 113.400 medições em dias e meses alternados, variando os horários entre 9h e 17h, a temperatura oscilou entre 27° a 32° graus, a umidade do ar entre 80% a 84% e a velocidade do vento variou de 20 km/h a 26 km/h.

A Tabela 1 conflita as características do vento com a altitude em João Pessoa com base nas medições feitas entre 1991 e 2020 e a melhores médias obtida nos experimentos.

É possível observar a influência da altitude nos parâmetros da energia eólica. Com o aumento da altitude dos dados extrapolados a velocidade estimada aumenta, dessa forma a energia e potência eólica que são ofertadas também aumentam. Para as medições feitas na rodovia a melhor média foi 3,80 m/s. A densidade de potência do vento chegou a 35,67 W/m². Assim, para cada metro quadrado rotor instalado na rodovia, na altura de 0,5 m, é oferecido, em média, 35,67 W de potência eólica. O teor médio anual obtido foi 312,44 kWh/(m².ano). Assim, em um ano e para cada metro quadrado de rotor é ofertado 312,44 kWh de energia eólica.

Tabela 1. Caracterização do vento em função da altitude de João Pessoa.

Parâmetros	Altura [m]					
	Dados Extrapolados			Dados medidos		
	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
V_{MED} [m/s]	1,39	1,67	1,87	3,80	3,48	3,5
P_{V^3} [W/m ²]	1,75	3,03	4,25	35,67	27,39	27,87
TEA [kWh/(m ² .ano)]	15,29	26,52	37,23	312,44	239,97	244,13

Fonte: Autora 2024.

5.1 Medição do vento – primeira coleta

Foi registrada a passagem de 4.246 veículos, de acordo com registros feitos pela câmera do notebook, onde a maior parte trata-se de automóveis de grande porte (caminhões, ônibus, carretas e caminhonetes).

O resultado coletado na distância de 0,50 m da rodovia está demonstrado na Tabela 2, onde consta as médias em todos os posicionamentos. Essa medição registrou na sua melhor performance uma rajada de vento com velocidade de 11,09 m/s (velocidade máxima registrada de todo o experimento), no ângulo de 45° e na altura de 0,50 m.

Tabela 2. Velocidade do vento medida de veículos em movimento, utilizando as alturas de 0,50 m, 1m e 1,5 m e os ângulos de 0°, 45° e 90° na distância de 0,50 m.

Distância 0,50 m		
Ângulo	Altura	Média
0°	0,50m	3,80 m/s
	1m	3,38 m/s
	1,5m	3,39 m/s
45°	0,50m	3,52 m/s
	1m	3,18 m/s
	1,5m	3,27 m/s
90°	0,50m	2,98 m/s
	1m	3,28 m/s
	1,5m	3,14 m/s

Fonte: Autora, 2023.

A distância de 1m a partir do meio fio, registrou uma velocidade máxima do vento de 10,33 m/s como mostra a Tabela 3. A performance de melhor desempenho foi na altura de 0,5 m do solo na posição do Ângulo de 45° à pista como dados da Tabela 3:

Tabela 3. Velocidade do vento medida de veículos em movimento, utilizando as alturas de 0,50 m, 1 m e 1,5 m e os ângulos de 0°, 45° e 90° na distância de 1 m.

Distância 1 m		
Ângulo	Altura	Média
0°	0,50m	2,36 m/s
	1m	1,91 m/s
	1,5m	1,91 m/s
45°	0,50m	2,62 m/s
	1m	2,34 m/s
	1,5m	2,35 m/s
90°	0,50m	1,86 m/s
	1m	1,75 m/s
	1,5m	2,03 m/s

Fonte: Autora, 2023.

As médias representadas na Tabela 4 são da distância de 1,5 m, onde atingiu uma velocidade do vento de 10,75 m registrada na altura de 0,5 m, no ângulo de 0°.

Tabela 4. Velocidade do vento medida de veículos em movimento, utilizando as alturas de 0,50m, 1m e 1,5m e os ângulos de 0°, 45° e 90° na distância de 1,5m.

Distância 1,5 m		
Ângulo	Altura	Média
0°	0,50m	3,79 m/s
	1m	3,57 m/s
	1,5m	3,44 m/s
45°	0,50m	3,73 m/s
	1m	3,16 m/s
	1,5m	3,18 m/s
90°	0,50m	2,52 m/s
	1m	2,05 m/s
	1,5m	2,15 m/s

Fonte: Autora, 2023.

Analisando as Tabelas 2,3 e 4, é visto que as melhores médias foram registradas na altura de 0,50m da base do solo, na distância de 0,5 m do meio fio e no ângulo de 0°, atingindo uma velocidade do vento de 3,80 m/s.

Bani-Hani *et at.*, (2018), instalou um protótipo de turbina Darrieus VAWT de três pás ao longo da Rodovia King Fahad Bin Abdul Aziz no Kuwait, onde se utilizou uma bateria para armazenamento e um anemômetro medindo a velocidade do vento antes de atingir as pás da turbina. Os posicionamentos variavam em 1 m, 1,5 m e 2 m de altura. A melhor performance foi na altura de 1,5 m, onde a melhor média registrada é de 5 m/s, prevendo uma potência elétrica de 60W.

AL- Aqel *et at.*, (2016) fez a medição na rodovia em Lebu SPA (Sungai Udang - Paya Rumpit - Ayer Keroh Highway). Um anemômetro de copo foi usado para medição da velocidade do vento. Foram utilizados os seguintes parâmetros para coletas: alturas de 0,50 m, 1 m e 1,5 m, de acordo com a base do solo, distância de 0,50 m, 1 m e 1,5 m, tendo como base o meio fio e também foram posicionados nos ângulos: paralelo, perpendicular e 45°. A melhor performance foi na altura de 1 m, distância de 1 m e ângulo de 45°. Não foi citada a melhor média das coletas, mas o valor máximo da velocidade atingida foi de 6 m/s.

Cardoso (2018) não utilizou um padrão na coleta, foram utilizadas alturas, distância e ângulos diferentes para fixação do anemômetro. As medições da velocidade do vento foram feitas em várias rodovias de Lisboa e se registrou uma velocidade máxima de 8 m/s.

A velocidade máxima registrada nessa primeira amostragem foi de 11,09 m/s, valor superior a outros trabalhos citados anteriormente. O valor médio foi de 3,80 m/s um valor próximo ao de Bani-Hani *et at.*, (2018), onde registrou em sua coleta um valor de 5 m/s e de Raheem *et at.*, (2020).

5.2 Medição do vento – segunda coleta

Nessa amostragem foi utilizado apenas a altura de 0,50 m do solo, para todas as coletas, as distâncias utilizadas foram 0,50 m, 1 m e 1,5 m e ângulos de 0°, 45° e 90°.

Durante a coleta de dados se registrou 1.887 veículos em movimento, em sua grande parte de pequeno porte (carro e moto), como aponta a gravação feita pelo notebook.

A maior rajada de vento registrada foi de 6,48 m/s, no ângulo de 45° e distância de 1 m. A maior velocidade média do vento foi de 1,95 m/s, predominou na distância de 0,50m no ângulo de 0°, semelhante a melhor performance da primeira coleta.

Os valores da velocidade média foram menores que as primeiras coletas como demonstrado na Tabela 5:

Tabela 5. Velocidade do vento medida de veículos em movimento, utilizando a altura de 0,50 m e os ângulos de 0°, 45° e 90° nas distâncias de 0,50 m, 1 m e 1,5 m.

Altura 0,50 m		
Ângulo	Distância	Média
0°	0,50m	1,95 m/s
	1m	1,94 m/s
	1,5m	1,64 m/s
45°	0,50m	1,82 m/s
	1m	1,75 m/s
	1,5m	1,80 m/s
90°	0,50m	1,51 m/s
	1m	1,92 m/s
	1,5m	1,63 m/s

Fonte: Autora 2023.

Durante o experimento houve pancadas de chuvas de curta duração e média intensidade, fator importante que influencia no funcionamento do aparelho.

5.3 Medição do vento – terceira coleta

O experimento da terceira coleta utilizou a altura de 0,50m as distâncias de 0,50m, 1m e 1,5m e os ângulos de 0°,45° e 90°.

Foram registrados 2.780 veículos, onde sua maioria de grande porte (caminhões, ônibus, carretas). Onde atingiu rajada de vento de 9,44 m/s na altura de 1,5 m, no ângulo de 45°. Sua melhor performances foi uma média de 2,37 m/s na distância de 1,5 m, no ângulo de 45°, como resultado na Tabela 6:

Tabela 6. Velocidade do vento medida de veículos em movimento, utilizando a altura de 0,50m e os ângulos de 0°, 45° e 90° nas distâncias de 0,50m, 1m e 1,5m.

Altura 0,50m		
Ângulo	Distância	Média
0°	0,50m	2,25 m/s
	1m	2,28 m/s
	1,5m	2,12 m/s
45°	0,50m	2,14 m/s
	1m	2,32 m/s
	1,5m	2,37 m/s
90°	0,50m	2,15 m/s
	1m	2,06 m/s
	1,5m	2,01 m/s







Fonte: Autora 2023.

Apesar da umidade alta em comparação a primeira coleta de dados, o dia estava com a temperatura quente e não houve pancadas de chuvas, o fluxo de veículos também se mostrou elevado.

5.4 Análise do processamento de dados para utilização de aerogeradores de pequeno porte.

Existem turbinas comerciais de pequeno porte que iniciam seu funcionamento com velocidade mínima de 1,5m/s, valores compatíveis com as velocidades médias registradas. Assim, através das características técnicas dos aerogeradores disponíveis no mercado e a média da velocidade de vento na rodovia, foi selecionado alguns modelos de aerogeradores de pequeno porte que poderiam ser utilizadas no local dos testes experimentais, como os modelos apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Aerogeradores de pequeno porte comercial com características compatíveis com o resultado do experimento.

Turbina	Modelo de Turbina eólica	Fabricante	Imagem
A	EN 100W - XL	Engelec Energy	
B	EN 100W- HX	Engelec Energy	
C	EN 500W - XL	Engelec Energy	
D	ENB 500W	Engelec Energy	
E	EN 300W - HQS	Engelec Energy	
G	V 300W	Aelos	

Fonte: Autora 2024.

As turbinas selecionadas oferecem geração de energia de pequena escala, são utilizadas para semáforo, iluminação de LED, segurança de câmera, residência off-grid e sistema de telecomunicações aéreas. Algumas turbinas possui um sistema de integração de energia solar,

formando uma captação híbrida, assim, aumenta a geração de energia. A Tabela 8 descreve as características das turbinas escolhidas de acordo com informações do fabricante.

Tabela 8. Descrições técnicas das turbinas comerciais.

Turbina	Velocidade do vento inicial (m/s)	Velocidade nominal (m/s)	Velocidade do vento de sobrevivência (m/s)	Altura do Cubo (m)	Diâmetro do cubo (m)	Qt de lâmina	Material das lâminas	Tipo do rotor
A	2	13	40	1,05	0,52	2	Fibra de vidro reforçada e fibra de carbono	Savonius
B	2,5	12	40	0,9	0,62	3	Reforce a Fibra de Vidro	Darrieus
C	2	13	40	1,5	0,67	2	Fibra de vidro reforçada e fibra de carbono	Savonius
D	1,5	12	45	1	1,4	4	Liga de alumínio	Darrieus & Savonius
E	1,5	11	35	1,4	0,95	5	Liga de alumínio	Darrieus & Savonius
F	1,5	10	50	1,6	1,2	3	Liga de alumínio	Darrieus

Fonte: Autora, 2024.

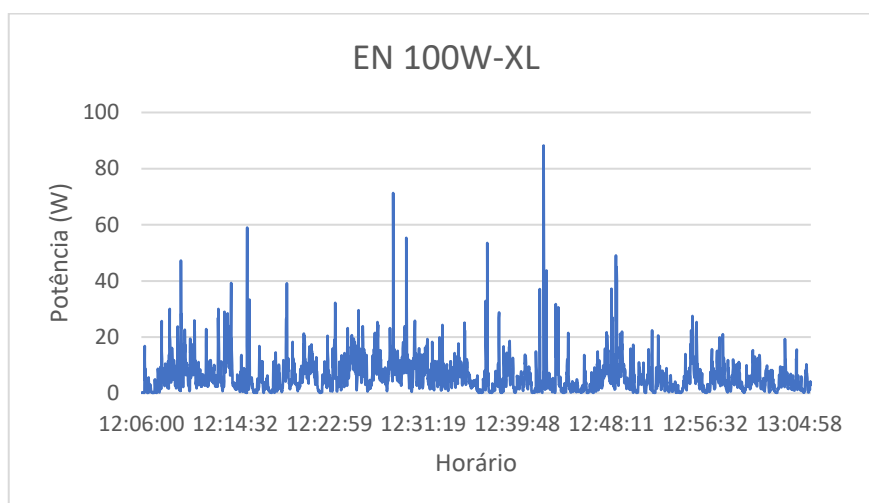
Os dados de velocidade do vento das melhores performances são convertidos em potência (Watt). Os resultados de potência obtidos são *potência teórica* assumindo o uso de aerogeradores de pequeno porte existentes no campo como referência para conversão de potência utilizando a Eq. 4.

De acordo com a velocidade de arranque de cada turbina, foi calculada a potência, utilizando a Equação 2, utilizando a velocidade média do vento do posicionamento de melhor desempenho, altura de 0,50m, distância de 0,50m e ângulo de 0°, experimento feito no mês de outubro das 12hr às 13hr10.

A EN 100W – XL é uma turbina Savonius de alto desempenho de saída de energia, compatível com a integração de painéis solares, podendo potencializar a geração de energia caso exista necessidade de expandir a demanda de consumo.

A turbina EN 100W – XL de acordo com as características do rotor foi a que demonstrou menor performance, atingindo aproximadamente 90 W. A potência máxima desse modelo, chega a atingir 110W assim mostra a Figura 47.

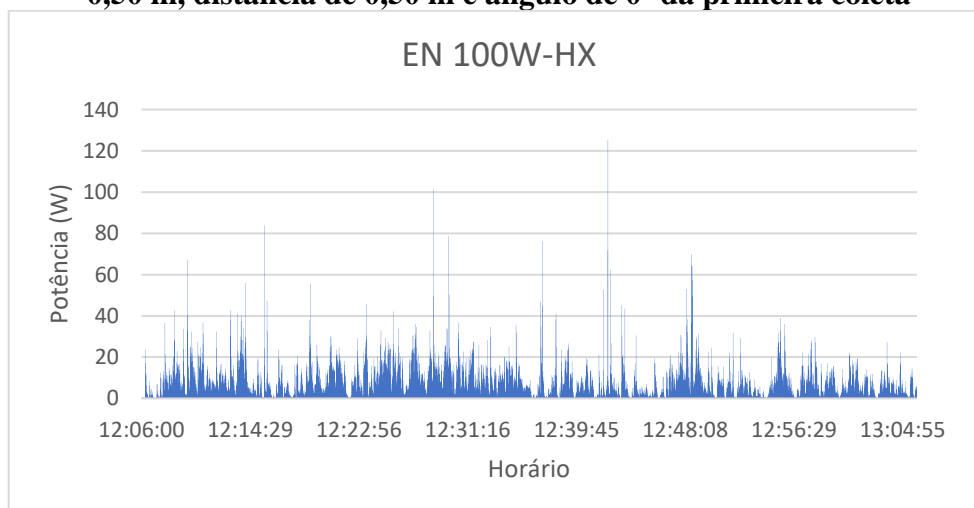
Figura 47. Potência estimada da turbina EN 100W – XL na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da primeira coleta.



Fonte: Autora 2024.

A EN 100W – HX é uma turbina Darrieus, com características semelhantes a EN 100W – XL, permite a geração de energia em velocidades de vento baixas e uma alta eficiência de saída em velocidade de vento de funcionamento. Estrutura leve e um alto fator de potência são vantagens desse modelo. A potência gerada por essa turbina utilizando os dados coletados da melhor performance atingiu 120W, como pode ser visto a Figura 48.

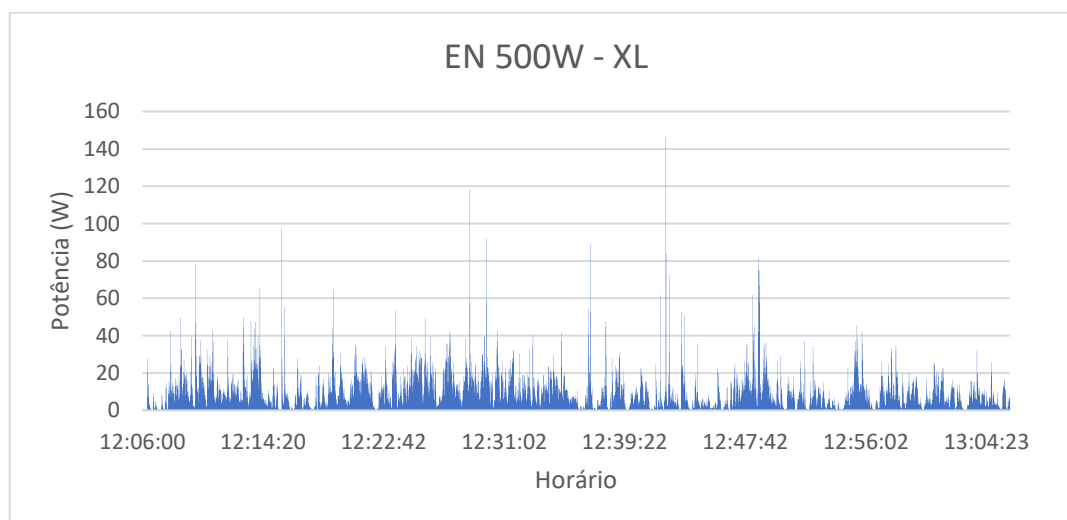
Figura 48. Potência estimada da turbina EN 100W – HX na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da primeira coleta



Fonte: Autora 2024.

A EN 500W – XL é uma turbina de rotor Savonius, silenciosa, robusta e pode conservar-se a ventos de até 40 m/s. Tem a facilidade de integrar com painéis solares para maior produção de energia. Na Figura 49 é apresentada a potência estimada que atingiu um pico de 140W.

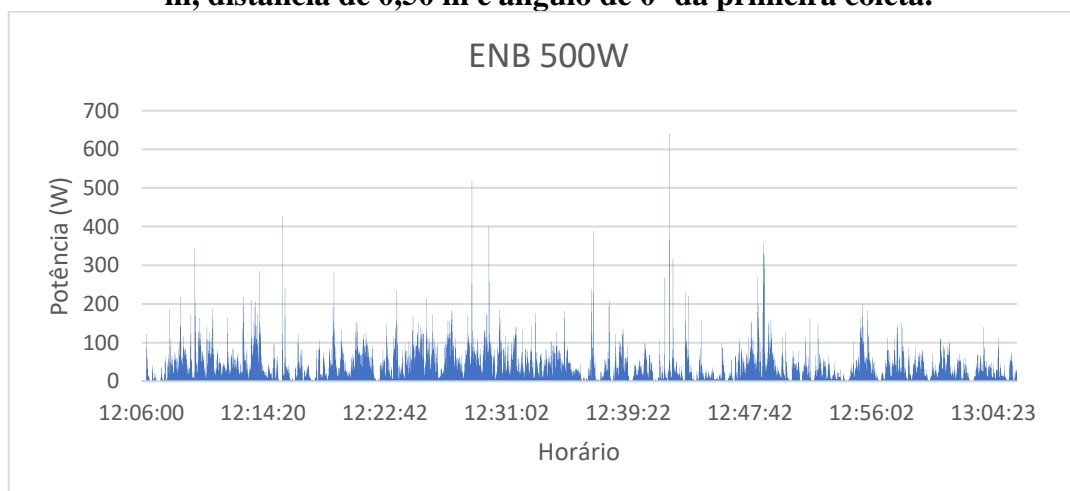
Figura 49. Potência estimada da turbina EN 500W – XL na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da primeira coleta.



Fonte: Autora 2024.

A ENB 500W ofereceu a melhor performance diante das outras, atingindo uma potência de 600W, mostra a Figura 50. Com sua alta eficiência de saída, essa turbina utiliza um rotor Darrieus e Savonius para seu funcionamento. Utilizada para sistema de iluminação de LED, semáforo entre outros sistemas de baixa demanda de energia. Sua velocidade de arranque é de 1,5 m/s, e se integra facilmente com painéis solares, aumentando a geração de energia.

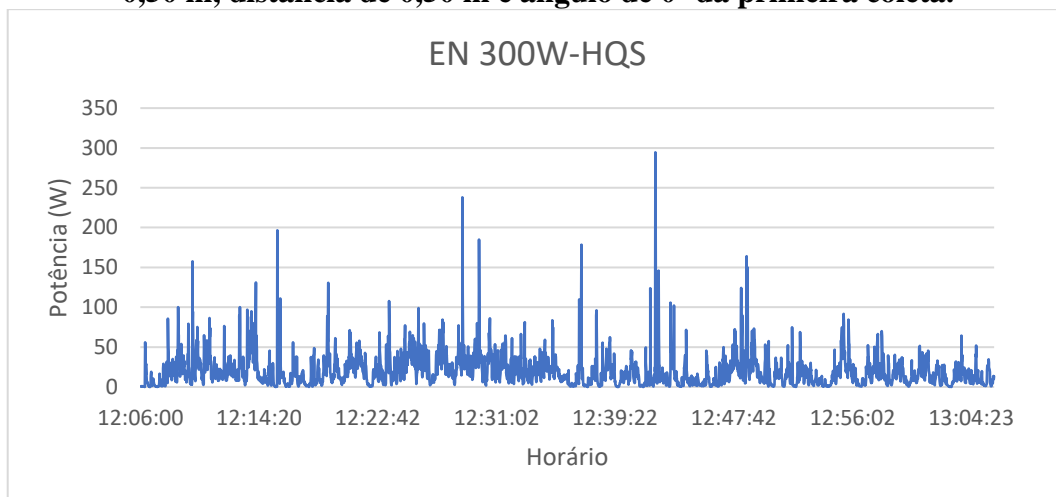
Figura 50. Potência estimada da turbina ENB 500W na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da primeira coleta.



Fonte: Autora, 2024.

A Figura 51 apresenta a potência estimada da turbina EN 300W-HQS, que é uma turbina Darrieus e Savonius, com baixa velocidade de arranque. É de fácil instalação e baixa vibração, podendo ser instalada para uso doméstico. Como pode ser observado no gráfico, essa turbina atingiu uma potência de aproximadamente 300W.

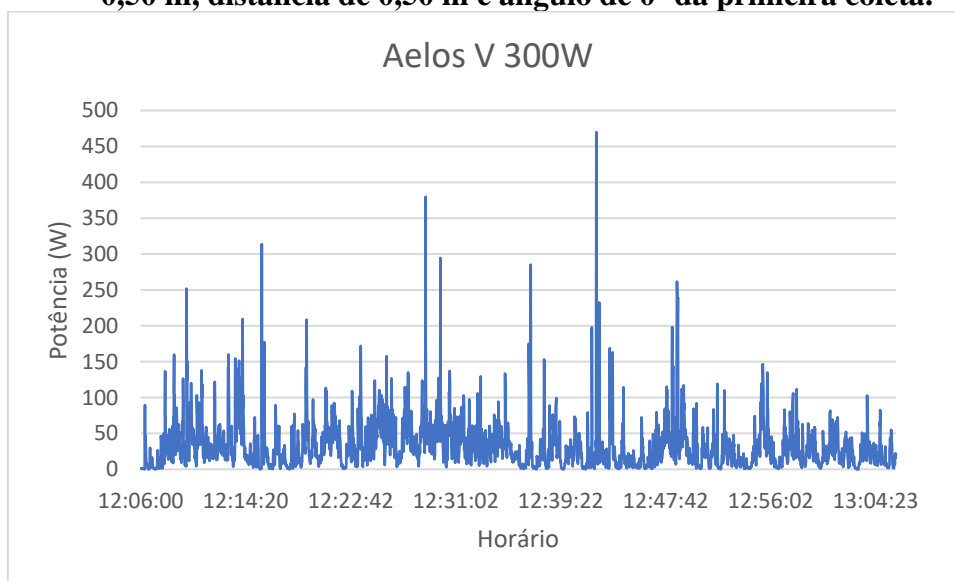
Figura 51. Potência estimada da turbina em 300W-HQS na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da primeira coleta.



Fonte: Autora 2024.

A Aelos V 300W é uma turbina Darrieus, de baixa velocidade de partida, utilizada em residência, iluminação pública entre outras áreas de baixo consumo. É silenciosa e leve e usa gerador trifásico. Esse modelo de turbina chegou a atingir uma potência de 450W na velocidade de melhor performance, como mostra a Figura 52.

Figura 52. Potência estimada da turbina Aelos V 300W na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da primeira coleta.



Fonte: Autora, 2024.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi analisado o potencial eólico na BR 101 no KM 101, utilizando anemômetros digitais para coleta de dados. A energia cinética da passagem do veículo e o vento natural foram registrados para estimar a potência da área.

As amostragens oscilaram entre a velocidade mínima de 1,01 m/s e a velocidade máxima de 11,09 m/s, com melhor performance na altura de 0,50m e na distância de 0,50m na posição de 0°.

A melhor média foi de 3,80 m/s, este valor supre a mínima necessidade exigida pelas turbinas de pequeno porte comerciais que é de 1,5 m/s para iniciar seu funcionamento. Diante da compatibilidade das velocidades médias do vento encontradas e das características das turbinas de pequeno porte comercial, foi encontrado potências atrativas para funcionamento e geração de energia em pequena escala.

Vale enfatizar que a potência varia com a variação da velocidade do vento que oscila de acordo com o porte do veículo, velocidade de percurso do mesmo, fluxo de passagem, velocidade do vento natural e umidade do ar, esses fatores justificam quem determinadas épocas do ano existe uma potencialidade maiores que outra.

Com análise aos resultados obtidos, concluiu-se que a Rodovia BR 101 no KM 101, tem potencialidade para geração de energia eólica rodoviária, sendo viável instalação de aerogeradores de pequeno porte para geração de energia elétrica, tendo em vista que o funcionamento das turbinas necessita de velocidade do vento muito baixas para começar a produzir eletricidade, sendo assim, as velocidades médias do vento registrada , supre a expectativa de utilização de tecnologias existentes, onde pode utilizar baterias para armazenamento, como também ser inserida diretamente na rede de distribuição para ser utilizada em benefício a sociedade, como iluminação pública, semáforos, sistemas de telecomunicação, tendo em vista que as rodovias são rotas rápidas de deslocamento de veículos diariamente, 24h por dia, onde existe uma demanda de iluminação constante.

Este conceito de sistema demonstra ser sustentável, evitando inserir gases poluentes na atmosfera e contribuindo com o desenvolvimento das energias renováveis, uma possibilidade eficaz de gerar energia natural.

A conversão da energia eólica através da turbina VWAT são aceitáveis e potencialmente colaboram com o desenvolvimento das energias limpas e renováveis.

7. TRABALHOS FUTUROS

Diante do apresentado, os resultados apresentam novas portas para a expansão e desenvolvimento. Fazer o experimento em outros trechos, como em outros quilômetros, outros sentidos, outras alturas e distâncias também seria interessante, assim verificaria a performance em outros posicionamentos. A coleta de dados em meses seguintes, durante um ano, para verificar o comportamento do vento mês a mês também é uma opção.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica. Fev. 2021. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/02/2021_02_18_InfoVento19.pdf.

ABEEÓLICA - associação brasileira de energia eólica. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 27 jun. 2023.

AHMAD, S, Abdul Mujeebu, M, Farooqi, MA. Colheita de energia de pavimentos e estradas: uma revisão abrangente de tecnologias, materiais e desafios. *Int J Energia Res.* 2019; 43: 1974-2015. <https://doi-org.ez15.periodicos.capes.gov.br/10.1002/er.4350>

A. H. Demirbas (2008) Cenário Global de Energia Geotérmica até 2040, Fontes de Energia, Parte A: Recuperação, Utilização e Efeitos Ambientais, 30:20, 1890-1895, DOI: [10.1080/15567030701468027](https://doi.org/10.1080/15567030701468027)

AKBARI, Hoda *et al.* Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 192, p. 144-168, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.052>. Acesso em: 26 abr. 2023.

AL-AQEL, A. A. *et al.* Potentiality of small wind turbines along highway in Malaysia. *In: 2016 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS, AUTOMATION AND SCIENCES (ICORAS), 2016, Ayer Keroh. 2016 international conference on robotics, automation and sciences (ICORAS).* [S. l.]: IEEE, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icoras.2016.7872634>. Acesso em: 2 ago. 2022.

ALI, Qazi Shahzad; KIM, Man-Hoe. Design and performance analysis of an airborne wind turbine for high-altitude energy harvesting. **Energy**, v. 230, p. 120829, set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120829>.

ALPHA 311 - Local renewable energy for the world. 2022. Disponível em: <https://alpha-311.com/>. Acesso em: 30 jan. 2023.

ANIC, Milos *et al.* The review of materials for energy harvesting. *In: 2021 IEEE 21ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOINFORMATICS AND BIOENGINEERING (BIBE), 2021, Kragujevac, Serbia. 2021 IEEE 21st international conference on bioinformatics and bioengineering (BIBE).* [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/bibe52308.2021.9635169>. Acesso em: 26 abr. 2023.

ANTAR, E.; ELKHOURY, M. Casing optimization of a Savonius wind turbine. **Energy Reports**, v. 6, p. 184-189, fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.040>.

ARANGO-ARAMBURO, S.; RÍOS-OCAMPO, J. P.; LARSEN, E. R. Examining the decreasing share of renewable energy amid growing thermal capacity: The case of South America. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109648, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109648>.

ATLAS da eficiência energética brasil 2021. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

[abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-651/Atlas2021_PT_2022_02_04.pdf](#). Acesso em: 29 jan. 2023.

ATLAS eólico - CEPEL. Disponível em: <https://www.cepel.br/atlas-eolico/>. Acesso em: 27 jun. 2023.

ATLAS eólico. 2016a. Disponível em: <https://mapaeolico.pb.gov.br/areas-promissoras/index.html>. Acesso em: 27 jun. 2023.

ATLAS eólico. 2016b. Disponível em: <https://mapaeolico.pb.gov.br/mapas-iterativos/mapa01.html?mapa=../assets/img/mapas/mapa6pt2>. Acesso em: 27 jun. 2023.

BALANÇO energético nacional 2022. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2023.

BALASHANMUGAM, P.; DHANASREE, R. Power generation from small wind mill. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 06, n. 05, p. 6686-6691, 2019.

BANI-HANI, Ehab Hussein *et al.* Feasibility of highway energy harvesting using a vertical axis wind turbine. **Energy Engineering**, v. 115, n. 2, p. 61-74, fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01998595.2018.11969276>.

BASHIR, Mohamed Bashir Ali. Principle parameters and environmental impacts that affect the performance of wind turbine: an overview. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 18 nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06357-1>.

BENCHMARKING internacional. 17 dez. 2021. Disponível em: https://csr.ufmg.br/otimizainfra/wp-content/uploads/2022/03/Bench_Internacional-PORT-17dez21.pdf. Acesso em: 29 jan. 2023.

BIANCHIN, Lucas Santin; BECK, Daniel; SEIDEL, Denílson José. Influência do número de estágios no torque estático da turbina eólica Savonius. **Revista Thema**, v. 17, n. 2, p. 309-317, 30 jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15536/thema.v17.2020.309-317.1390>. Acesso em: 28 jun. 2022.

CARDOSO, Ivanilda Tavares. **Aproveitamento energético do fluxo de ar resultante da passagem dos automóveis nas (auto-) estradas**. 2018. MasterThesis — [s. n., s. l.], 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/75612>.

Cartaxo, B. R. (2020). Do litoral ao sertão: a energia eólica no estado da Paraíba. *Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade*, 9 (19), 75-90.

CASTELLANI, Francesco *et al.* Experimental vibration analysis of a small scale vertical wind energy system for residential use. *Machines*, v. 7, n. 2, p. 35, 22 maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/machines7020035>. Acesso em: 28 jun. 2022.

CHANG, Tian Pau. Estimation of wind energy potential using different probability density functions. **Applied Energy**, v. 88, n. 5, p. 1848-1856, 2011.

CONSTANZA Martínez Gaete. "“Smart Highway”": Inauguração do primeiro trecho de uma rodovia solar na Holanda" 06 Ago 2014. ArchDaily Brasil. Acessado 14 Jun 2022. <<https://www.archdaily.com.br/br/625183/smart-highway-inauguracao-do-primeiro-trecho-de-uma-rodovia-solar-na-holanda>> ISSN 0719-8906

CONTAGEM contínua. 2019. Disponível em: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/ContagemContinua>. Acesso em: 1 fev. 2023.

CUNHA, Ana Luiza Xavier *et al.* Análise dos impactos ambientais causados pela implantação de parques eólicos no Seridó Paraibano. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, p. e70111638050, 30 nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i16.38050>. Acesso em: 27 jun. 2023.

DALMAZ, Alessandro. **Estudo do potencial eólico e previsão de ventos para geração de eletricidade em Santa Catarina**. 2007. Florianópolis, SC, [s. l.], 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/90185>. Acesso em: 3 out. 2023.

DE BONA, Jéssica Ceolin; FERREIRA, João Carlos Espindola; ORDOÑEZ DURAN, Julian Fernando. Analysis of scenarios for repowering wind farms in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110197, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110197>.

DE JONG, Pieter *et al.* Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable Energy**, v. 141, p. 390-401, out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.086>. Acesso em: 29 jul. 2022.

DETRAN-PB, EVOLUÇÃO DA FROTA GERAL - 2000 A 2021. 7 abr. 2022. Disponível em: <https://detran.pb.gov.br/institucional-1/estatisticas/evolucao-da-frota-geral-2000-a-2021.pdf/view>. Acesso em: 21 nov. 2022.

DHANASEKAR, J.; SENGOTTUVEL, P.; PALANIKUMAR, K. Implementation of effective fuel saving methodology for turbines using air drag in vehicles. **Materials Today: Proceedings**, v. 16, p. 421-429, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.110>.

DIÓGENES, Jamil Ramsi Farkat; CLARO, João; RODRIGUES, José Coelho. Barriers to onshore wind farm implementation in Brazil. **Energy Policy**, v. 128, p. 253-266, maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.062>.

DIUANA, Fabio A.; VIVIESCAS, Cindy; SCHAEFFER, Roberto. An analysis of the impacts of wind power penetration in the power system of southern Brazil. **Energy**, v. 186, p. 115869, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115869>.

DNIT É responsável por doze rodovias federais na Paraíba e conta com três Unidades Locais. 10 jun. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/dnit-e-responsavel-por-doze-rodovias-federais-na-paraiba-e-conta-com-tres-unidades-locais#:~:text=Rodovias%20-%20Doze%20rodovias%20federais%20sob%20administração%20do,conservação,%20manutenção,%20implantação,%20adequação,%20sinalização,%20planejamento%20e%20projetos>.

DUARTE JACONDINO, William *et al.* Hourly day-ahead wind power forecasting at two wind farms in northeast Brazil using WRF model. **Energy**, v. 230, p. 120841, set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120841>.

DUTTON, Alastair. **Global offshore wind report 2021**. 9 set. 2021. Disponível em: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/09/GWEC-offshore-wind-2021-updated-1.pdf>.

ELBARBARY, S., Abdel Zaher, M., Saibi, H. *et al.* Perspectivas geotérmicas de energia renovável do continente africano usando SIG. *Geotherm Energia* **10**, 8 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00219-1>

ENABLING wind to contribute to a distributed energy future. 28 mar. 2019. Disponível em: <https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2021/01/IEA-Wind-Task-41-Work-Plan.pdf>.

ENERGIA eólica ultrapassa 20 GW de capacidade instalada no Brasil - ABEEólica. 22 nov. 2021. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica-ultrapassa-20-gw-de-capacidade-instalada-no-brasil/>.

ENGELEC energy.professional vertical wind turbines, vertical wind generators supplier - YUEQING ENGELEC ELECTRIC TECHNOLOGY CO.,LTD. Disponível em: <http://www.engelecenergy.com/Vertical-Axis-Wind-Turbines-pc570767.html>. Acesso em: 13 ago. 2023.

EPE - transporte rodoviário de cargas - benchmarking internacional. Fev. 2022. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09%20\[PT\].pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09%20[PT].pdf). Acesso em: 17 ago. 2022.

EPE - relatório síntese 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_Síntese_2021_PT.pdf. Acesso em: 12 jul. 2022.

FAERSTEIN, Eduardo. **A saúde global na agenda 2030 | museu do amanhã**. 2021. Disponível em: [https://museudoamanha.org.br/pt-br/a-saude-global-na-agenda-2030-objetivos-do-desenvolvimento-sustentavel#:~:text=Assegurar%20uma%20vida%20saudável%20e%20promover%20o%20bem-estar,da%20Organização%20das%20Nações%20Unidas%20\(ONU\),%20em%202015](https://museudoamanha.org.br/pt-br/a-saude-global-na-agenda-2030-objetivos-do-desenvolvimento-sustentavel#:~:text=Assegurar%20uma%20vida%20saudável%20e%20promover%20o%20bem-estar,da%20Organização%20das%20Nações%20Unidas%20(ONU),%20em%202015). Acesso em: 29 jan. 2023.

FAN, Shifa; GAO, Yuanwen. Numerical simulation on thermoelectric and mechanical performance of annular thermoelectric generator. **Energy**, v. 150, p. 38-48, maio 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.124>. Acesso em: 30 abr. 2023.

FRIEDRICH, Johannes. **A trajetória dos 10 maiores emissores de carbono desde o Acordo de Paris em gráficos interativos**. 6 jan. 2021. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/trajetoria-dos-10-maiores-emissores-de-carbono-desde-o-acordo-de-paris-em-graficos>. Acesso em: 29 jan. 2023.

FROTA de veículos - 2022. 22 fev. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2022>. Acesso em: 2 jun. 2022.

GABRIEL FILHO, Luís RA et al. Caracterização analítica e geométrica da metodologia geral de determinação de distribuições de Weibull para o regime eólico e suas aplicações. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 56-66, 2011.

GAETE, Constanza Martínez. “**Smart Highway**”: Inauguração do primeiro trecho de uma rodovia solar na Holanda. 6 ago. 2014. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/625183/smart-highway-inauguracao-do-primeiro-trecho-de-uma-rodovia-solar-na-holanda>.

GALVÃO, Maria Luiza de Medeiros *et al.* Connections between wind energy, poverty and social sustainability in brazil's semiarid. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 864, 23 jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12030864>.

GLOBAL offshore wind report 2022. 2022. Disponível em: <https://energycentral.com/system/files/ece/nodes/554445/gwec-global-offshore-wind-report-2022.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2023.

GLOBAL wind report 2022. 4 abr. 2022. Disponível em: https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/04/Annual-Wind-Report-2022_screen_final_April.pdf.

GONZÁLEZ, Mario Orestes Aguirre *et al.* Regulation for offshore wind power development in Brazil. **Energy Policy**, v. 145, p. 111756, out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111756>.

GORAYEB, Adryane *et al.* Wind power gone bad: Critiquing wind power planning processes in northeastern Brazil. **Energy Research & Social Science**, v. 40, p. 82-88, jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.11.027>.

GOVERNO da paraiba. 1 out. 2021. Disponível em: <https://paraiba.pb.gov.br/noticias/paraiba-se-destaca-na-producao-de-energias-renovaveis-e-contribui-para-preservacao-ambiental#:~:text=Atualmente,%20a%20Paraíba%20tem%2021%20parques%20eólicos%20e%20mais%2014%20outorgados%20que%20totalizam%20589,14%20MW>. Acesso em: 27 jun. 2023.

GOVERNO do brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/energia-renovavel-chega-a-quase-50-da-matriz-eletrica-brasileira-1>.

HASHEM, I.; MOHAMED, M. H. Aerodynamic performance enhancements of H-rotor Darrieus wind turbine. **Energy**, v. 142, p. 531-545, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.036>.

HASSAN, U.; SYKES, D.M. Wind structure and statistics. In: FRERIS, L.L. (Ed.). Wind energy conversion systems. New York: Prentice Hall, 1990. p.11-32.

HU, Mengjin *et al.* Evaluation of the economic potential of photovoltaic power generation in road spaces. **Energies**, v. 15, n. 17, p. 6408, 2 set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15176408>. Acesso em: 26 abr. 2023.

IBGE,2021a energia geotermica. 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/atlas_nacional/pdf/andb2022_02_13_Energia_Geotermica%20da%20Crosta.pdf. Acesso em: 30 jun. 2023.

IBGE,2021b Fluxo geotérmico. 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/atlas_nacional/pdf/andb2022_02_14_Fluxo_Geotermico.pdf. Acesso em: 30 jun. 2023.

IBGE projeção da população. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/pesquisa/53/49645>. Acesso em: 28 out. 2022.

IEA 2021, Mobility Model, June 2021 version. OECD/IEA, Paris, <https://www.iea.org/areasof-work/programmes-and-partnerships/the-iea-mobility-model>.

INSTITUTO nacional de meteorologia - INMET. 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 20 jan. 2024.

IRENA - perspectiva da transição energética mundial. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_WETO_Summary_2021_PT.pdf?la=en&hash=1412FF3217A507727E0CD71E1338118C64FCF8EF. Acesso em: 4 out. 2022.

ISMAEEL, Tareq *et al.* Energy recovery of moving vehicles' wakes in highways by vertical axis wind turbines. **FME Transactions**, v. 48, n. 3, p. 557-565, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5937/fme2003557i>.

Ji, Qiang; ZHANG, Dayong. How much does financial development contribute to renewable energy growth and upgrading of energy structure in China? **Energy Policy**, v. 128, p. 114-124, maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.047>.

JIANG, L. *et al.* Analysis of wind turbine Gearbox's environmental impact considering its reliability. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 846-857, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.078>.

JONES, Dave. Eólica e solar geram em 2021, pela 1ª vez, 10% da eletricidade global. **Agência Brasil**, 30 de março de 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2022-03/eolica-e-solar-geram-10-da-eletricidade-global-pela-1a-vez-em-2021>.

KIRUBA.K *et al.* Enhancement of power generation in highway using wind energy conversion system integrated with PV. In: KIRUBA.K *et al.* **Recent trends in intensive computing**. [S. l.]: IOS Press, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3233/apc210300>.

LADENBURG, Jacob *et al.* The offshore-onshore conundrum: Preferences for wind energy considering spatial data in Denmark. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 121, p. 109711, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109711>.

LEE, Hye-Jeong; YOO, Seung-Hoon; HUH, Sung-Yoon. Public perspectives on reducing the environmental impact of onshore wind farms: a discrete choice experiment in South Korea. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 20, p. 25582-25599, 30 abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08949-0>.

LEVENDA, A. M.; BEHRISIN, I.; DISANO, F. Renewable energy for whom? A global systematic review of the environmental justice implications of renewable energy technologies. **Energy Research & Social Science**, v. 71, p. 101837, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101837>.

LI, Sinan; MA, Tao; WANG, Dengjia. Photovoltaic pavement and solar road: a review and perspectives. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 55, p. 102933, fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102933>. Acesso em: 26 abr. 2023.

LIMA, M. A. *et al.* Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: Reaching the goals of the Paris agreement in Brazil. **Environmental Development**, v. 33, p. 100504, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100504>.

LIMA, Thiago Novelli de Abreu e. Projeto de um protótipo de uma turbina eólica de eixo horizontal. 2015. 99 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

LIU, Kan; YU, Meilin; ZHU, Weidong. Enhancing wind energy harvesting performance of vertical axis wind turbines with a new hybrid design: a fluid-structure interaction study. **Renewable Energy**, v. 140, p. 912-927, set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.120>.

LOPES, Renato Francisco Cândido. **Efeitos da TSM dos oceanos Atlântico e Pacífico tropicais sobre o vento no Estado da Paraíba**. 2022. 68 fl. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2022. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/27222>.

MACHADO, Nayara. **Mundo adicionou 257 GW de renováveis em 2021**. 26 abr. 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/mundo-adicionou-257-gw-de-renovaveis-em-2021/>.

MANIFESTO global de energia eólica para a COP27 | 2022. 2022. Disponível em: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/10/Brazilian-Portuguese-COP27-Manifesto.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2023.

MARTINEZ, A.; IGLESIAS, G. Mapping of the levelised cost of energy for floating offshore wind in the European Atlantic. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 154, p. 111889, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111889>.

MARTÍNEZ-MENDOZA, Eduardo; RIVAS-TOVAR, Luis Arturo; GARCÍA-SANTAMARÍA, Luis Enrique. Wind energy in the Isthmus of Tehuantepec: conflicts and social implications. **Environment, Development and Sustainability**, 4 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01136-8>.

MEASNET “Anemometer Calibration Procedure” V.3 December 2020.

MEDEIROS, Valdemar. **Nova turbina eólica gera energia apenas com movimentação dos veículos na pista e promete revolucionar a geração da energia renovável no mundo**. 12 maio 2021. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/nova-turbina-eolica-gera-energia-apenas-com-movimentacao-dos-veiculos-na-pista-e-promete-revolucionar-a-geracao-da-energia-renovavel-no-mundo/>.

MERCADO a observar: Aumentando a ambição climática e planos de recuperação verde para um futuro de 1,5°C. 29 maio 2020. Disponível em: <https://gwec.net/market-to-watch-ramping-up-climate-ambition-and-green-recovery-plans-for-a-1-5c-future/>.

MOHAMED, M. H.; DESSOKY, A.; ALQURASHI, Faris. Blade shape effect on the behavior of the H-rotor Darrieus wind turbine: performance investigation and force analysis. **Energy**, v. 179, p. 1217-1234, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.069>.

MOHAN KUMAR, Palanisamy *et al.* Experimental and numerical investigation of novel Savonius wind turbine. **Wind Engineering**, v. 43, n. 3, p. 247-262, 6 jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0309524x18780392>.

NICOLAU, Olivia Nascimento Boldrini; CHAVES, Gisele De Lorena Diniz; ZANCHETTA, Igor Tureta. Avaliação do consumo energético e emissões de dióxido de carbono do transporte rodoviário do Brasil (2016-2026). *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 54, 5 out. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/dma.v54i0.62606>.

ODS 7 - energia acessável e limpa - ipea - objetivos do desenvolvimento sustentável. 2019. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods7.html>. Acesso em: 29 jan. 2023.

OSÓRIO, André. Energia renovável chega a quase 50% da matriz energética brasileira. **Matriz Energética** 11 de agosto de 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/energia-renovavel-chega-a-quase-50-da-matriz-eletrica-brasileira-1>.

PALLOTTA, A.; PIETROGIACOMI, D.; ROMANO, G. P. HYBRI – A combined Savonius-Darrieus wind turbine: performances and flow fields. **Energy**, v. 191, p. 116433, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116433>.

PATIL, Rohit *et al.* Large eddy simulation of an H-Darrieus rotor. **Energy**, v. 160, p. 388-398, out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.203>.

PENG, Xiaokang; LIU, Zicheng; JIANG, Dong. A review of multiphase energy conversion in wind power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 147, p. 111172, set. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111172>. Acesso em: 04 de maio de 2023.

PERCENTAGEM da população com acesso à eletricidade. 2019. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/objetivo7/indicador711>. Acesso em: 29 jan. 2023.

PICOLO, Ana Paula; RÜHLER, Alexandre J.; RAMPINELLI, Giuliano Arns. An approach to the wind energy as an alternative for teaching topics of classical physics. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, p. 01-13, 2014.

PNCT, contagem contínua. 14 out. 2014. Disponível em: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/ContagemContinua>. Acesso em: 1 nov. 2022.

RAHEEM, Adnan Ahmed Abdul; IBRAHEEM, Wadhah Esmaeel. Highway wind power energy assessment of Al-Durra highway street in Baghdad, Iraq. **International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)**, v. 11, n. 4, p. 2055, 1 dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i4.pp2055-2061>. Acesso em: 9 set. 2023.

RAHMAN, Mohammad Mafizur; VELAYUTHAM, Eswaran. Renewable and non-renewable energy consumption-economic growth nexus: New evidence from South Asia. **Renewable Energy**, v. 147, p. 399-408, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.007>.

RAMÍREZ, Penélope; CARTA, José Antonio. Influence of the data sampling interval in the estimation of the parameters of the Weibull wind speed probability density distribution: a case study. **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. 15-16, p. 2419-2438, 2005.

REN, Zhengru *et al.* Offshore wind turbine operations and maintenance: a state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 110886, jul. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110886>.

REZENDE SERAFIM, Manasses. **Exploração da viabilidade do potencial eólico rodoviário**. 2015. 46 p. Monografia — Instituto Tecnológico de Caratinga, Minas gerais, 2015.

RODRIGUES, Robson. **Contratos de energia eólica e solar no mercado livre crescem 37% em 2021**. 16 mar. 2022. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2022/03/16/contratos-de-energia-elica-e-solar-no-mercado-livre-crescem-37-pontos-percentuais-em-2021.ghtml>.

SADORSKY, Perry. Wind energy for sustainable development: driving factors and future outlook. **Journal of Cleaner Production**, p. 125779, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125779>.

SAHIM, Kaprawi; SANTOSO, Dyos; PUSPITASARI, Dewi. Investigations on the effect of radius rotor in combined darrieus-savonius wind turbine. **International Journal of Rotating Machinery**, v. 2018, p. 1-7, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/3568542>.

SAIDI, Kais; OMRI, Anis. The impact of renewable energy on carbon emissions and economic growth in 15 major renewable energy-consuming countries. **Environmental Research**, v. 186, p. 109567, jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109567>.

SALEEM, Arslan; KIM, Man-Hoe. Effect of rotor axial position on the aerodynamic performance of an airborne wind turbine system in shell configuration. **Energy Conversion and Management**, v. 151, p. 587-600, nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.026>.

SAMPAIO, Keila Regina Alves; BATISTA, Valmir. O atual cenário da produção de energia eólica no Brasil: uma revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, p. e57710112107, 31 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.12107>.

SANTHAKUMAR, Senthilvel; PALANIVEL, Ilamathi; VENKATASUBRAMANIAN, Krishnanand. A study on the rotational behaviour of a Savonius Wind turbine in low rise highways during different monsoons. **Energy for Sustainable Development**, v. 40, p. 1-10, out. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.05.002>.

SAQR, Khalid M.; MUSA, Md Nor. A perspective of the Malaysian highway energy consumption and future power supply. **Energy Policy**, v. 39, n. 6, p. 3873-3877, jun. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.034>.

SILVA, Amanda Jorge Vinhoza de Carvalho. Spatial assessment of the potential for reusing decommissioned platforms to generate offshore wind energy in Brazil. **Rio Oil and Gas Expo and Conference**, v. 20, n. 2020, p. 564-565, 1 dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2020.564>.

SINGH, Shweta; SINGH, Sarita. Vertical axis wind turbine for generation of electricity through highway windmill. **SAMRIDDHI**: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology, v. 7, n. 02, p. 99-104, 25 dez. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.18090/samriddhi.v7i2.8633>.

SIVARAJ, G.; PARAMMASIVAM, K. M.; SUGANYA, G. Reduction of aerodynamic drag force for reducing fuel consumption in road vehicle using basebleed. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, v. 11, n. 6, p. 1489-1495, 1 nov. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.29252/jafm.11.06.29115>.

THE FINAL warning bell. Ago. 2021. Disponível em: https://static1.squarespace.com/static/60ccae658553d102459d11ed/t/612f491253769c13f5e52b1d/1630488861782/CCAG+Beyond+Net+Zero_V2.1.pdf.

TIAN, Wenlong; SONG, Baowei; MAO, Zhaoyong. Numerical investigation of wind turbines and turbine arrays on highways. **Renewable Energy**, v. 147, p. 384-398, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.123>.

TOUDARBARI, Sadegh; MAGHREBI, Mohammad Javad; HASHEMZADEH, Amirhomayoun. Evaluation of Darrieus wind turbine for different highway settings using CFD simulation. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 45, p. 101077, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101077>.

TRACKING SDG7: the energy progress report, 2022 – analysis - IEA. Jun. 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-sdg7-the-energy-progress-report-2022>. Acesso em: 1 set. 2022.

VAICBERG, H., Valiatt, G., & Ferreira, M. (2021). Energia eólica offshore: Um overview do cenário global e o contexto brasileiro. *Revista De Direito E Negócios Internacionais Da Maritime Law Academy - International Law and Business Review*, 1(1), 114–143. Recuperado de <https://mlawreview.emnuvens.com.br/mlaw/article/view/6>

VINHOZA, Amanda; SCHAEFFER, Roberto. Brazil's offshore wind energy potential assessment based on a Spatial Multi-Criteria Decision Analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 146, p. 111185, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111185>.

WANG, Hao; JASIM, Abbas; CHEN, Xiaodan. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review. **Applied Energy**, v. 212, p. 1083-1094, fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.125>.

WANG, Lujiong; ZHONG, Rui; LIU, Lin. Resonance characteristics of onshore wind turbine tower structure considering the impedance of piled foundations. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 4, fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5163-9>.

WANG, Zhenyu; WANG, Yuchen; ZHUANG, Mei. Improvement of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines with leading-edge serrations and helical blades using CFD and Taguchi method. **Energy Conversion and Management**, v. 177, p. 107-121, dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.028>.

WEI, Jian *et al.* Recent advances in thermoelectric technology to harvest energy from the pavement. **International Journal of Energy Research**, 8 abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/er.7930>. Acesso em: 3 maio 2023.

WORLD FIRST as Alpha 311 traffic-powered wind turbines head to Telford, UK. 3 maio 2022. Disponível em: <https://alpha-311.com/news/worlds-first-roadside-deployment-of-alpha-311-turbines-for-telford-wrekin-council/>.

WORLD RESOURCES Institute Brasil -4 gráficos para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor. 28 fev. 2020. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/4-graficos-para-entender-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor>. Acesso em: 22 set. 2022.

WU, Xiaoni *et al.* Foundations of offshore wind turbines: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 104, p. 379-393, abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.012>.

XIANG, Bo *et al.* A novel hybrid energy system combined with solar-road and soil-regenerator: dynamic model and operational performance. **Energy Conversion and Management**, v. 156, p. 376-387, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.066>. Acesso em: 26 abr. 2023.

XU, Jian *et al.* Energy crisis, firm profitability, and productivity: an emerging economy perspective. **Energy Strategy Reviews**, v. 41, p. 100849, maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100849>.

XU, Wenhao *et al.* High-resolution numerical simulation of the performance of vertical axis wind turbines in urban area: Part I, wind turbines on the side of single building. **Renewable Energy**, v. 177, p. 461-474, nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.071>.

YAN, Jing; OUYANG, Tinghui. Advanced wind power prediction based on data-driven error correction. **Energy Conversion and Management**, v. 180, p. 302-311, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.108>.

YANG, Li *et al.* Operations & maintenance optimization of wind turbines integrating wind and aging information. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 12, n. 1, p. 211-221, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tste.2020.2986586>.

YANG, Yuqing *et al.* Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 109-125, ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.047>.

ZAFAR, Muhammad Wasif *et al.* From nonrenewable to renewable energy and its impact on economic growth: The role of research & development expenditures in Asia-Pacific Economic Cooperation countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 1166-1178, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.081>.

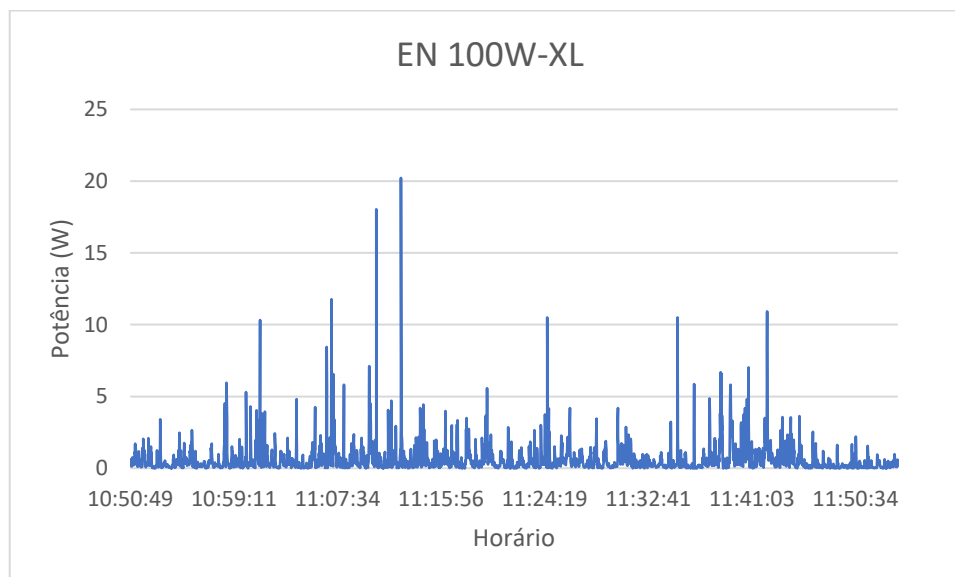
ZHANG, Zh. Conceptual errors in actuator disc theory and betz's law for wind turbines. **Energies**, v. 15, n. 16, p. 5902, 15 ago. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15165902>. Acesso em: 6 jun. 2023.

ZHAO, Jun *et al.* How renewable energy alleviate energy poverty? A global analysis. **Renewable Energy**, v. 186, p. 299-311, mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.005>.

ZHAO, Zhenzhou *et al.* A review: approaches for aerodynamic performance improvement of lift-type vertical axis wind turbine. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 49, p. 101789, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101789>

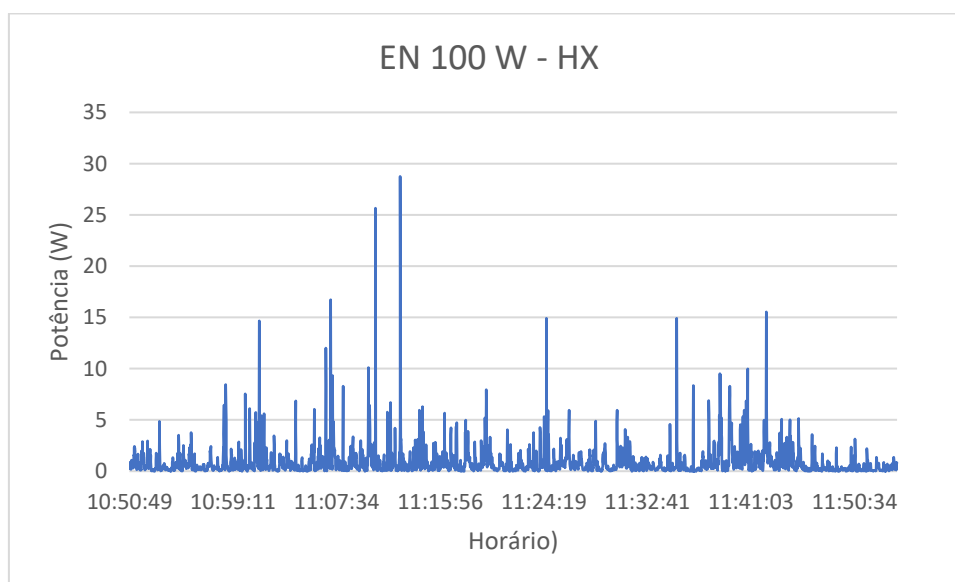
APÊNDICE

Figura 53. Potência estimada da turbina EN 100W – XL na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da segunda coleta.



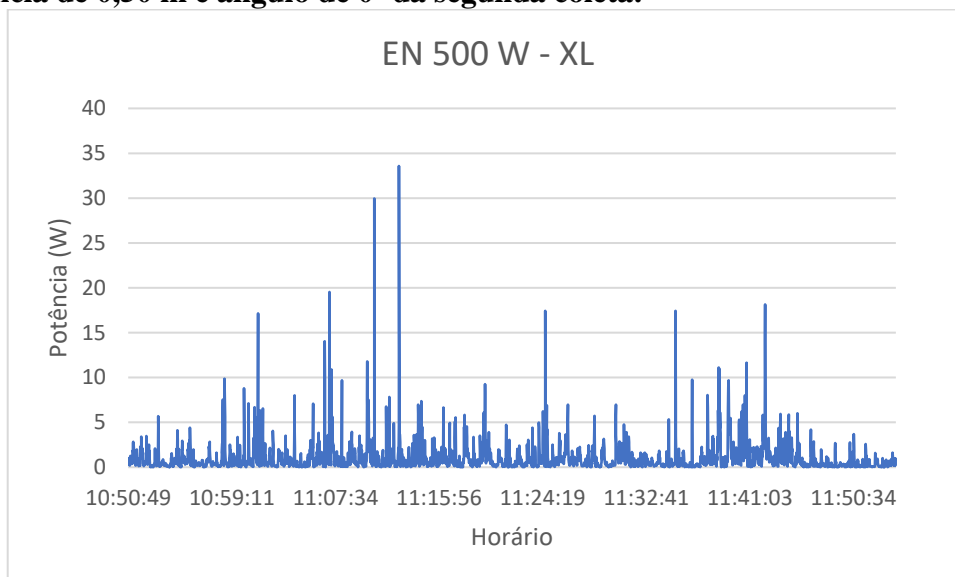
Fonte: Autora 2024.

Figura 54. Potência estimada da turbina EN 100W – HX na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da segunda coleta.



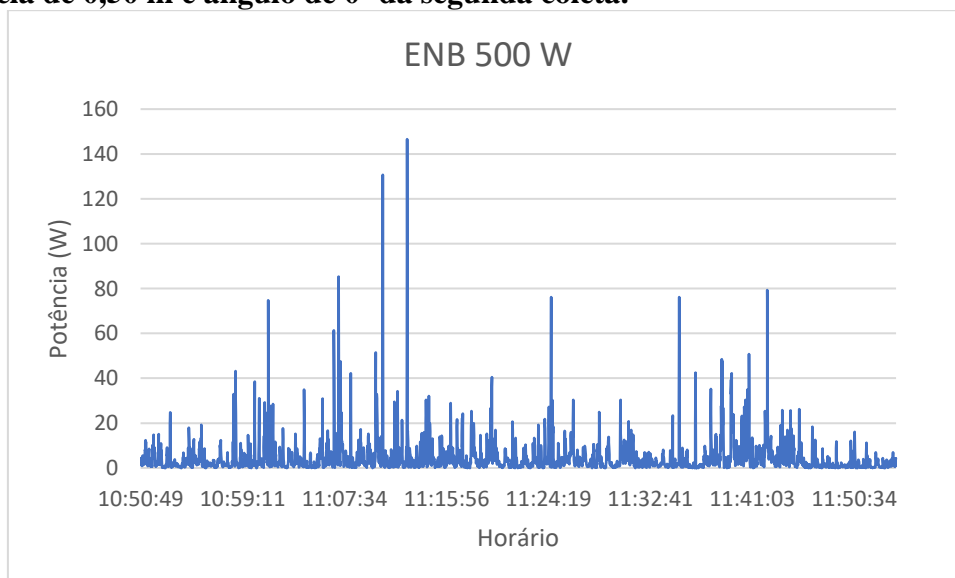
Fonte: Autora 2024.

Figura 55. Potência estimada da turbina EN 500W – XL na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da segunda coleta.



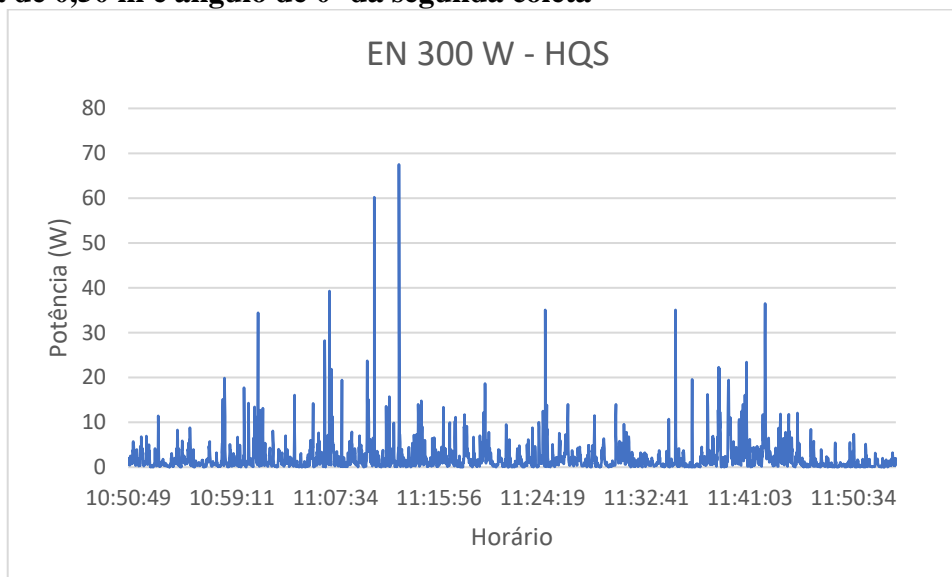
Fonte: Autora 2024.

Figura 56. Potência estimada da turbina ENB 500W na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da segunda coleta.



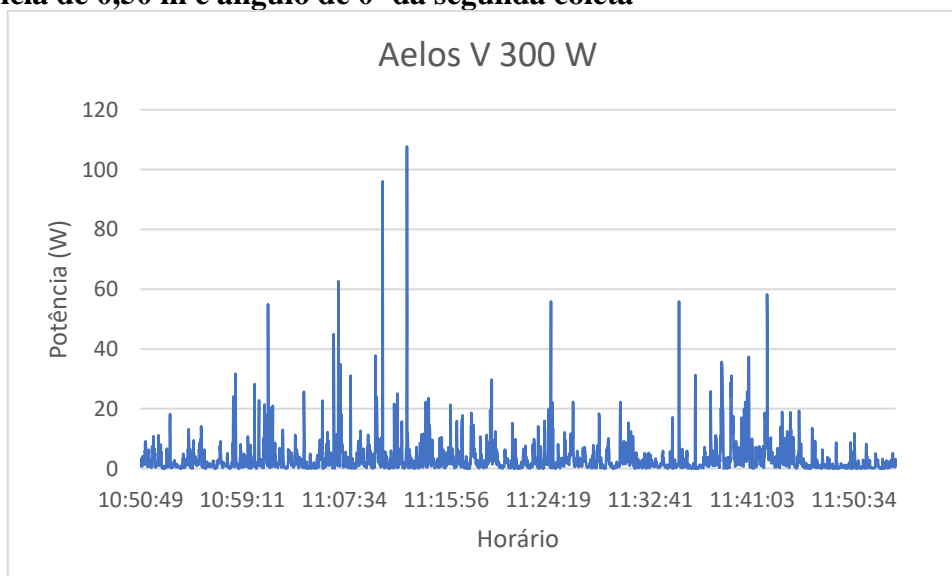
Fonte: Autora 2024.

Figura 57. Potência estimada da turbina ENB 500W na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da segunda coleta



Fonte: Autora 2024.

Figura 58. Potência estimada da turbina Aelos V 300W na performance da altura de 0,50 m, distância de 0,50 m e ângulo de 0° da segunda coleta



Fonte: Autora 2024.