

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - CAMPUS ERECHIM

DOUGLAS CIMA

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA E EFICIÊNCIA DE TURBINAS EÓLICAS
DE PEQUENO PORTE**

ERECHIM

2024

DOUGLAS CIMA

**SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA E EFICIÊNCIA DE TURBINAS EÓLICAS
DE PEQUENO PORTE**

Trabalho Conclusão de Curso realizado no Campus Erechim do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Rogério Machado Pereira

Erechim

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus, que me deu saúde, força e perseverança durante esta caminhada.

A minha família, em especial aos meus pais, Jacir e Helena, que sempre me apoiaram e motivaram ao longo de toda minha vida.

A minha namorada Camili, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e incentivando, mantendo-me firme e concentrado nos meus objetivos.

Aos meus amigos e colegas, que tanto me ajudaram durante todos esses anos de graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Rogério Machado Pereira, pela orientação, disponibilidade e dedicação durante todo o processo. Sem a sua ajuda, a realização deste trabalho não seria possível.

Ao Prof. Dr. José Antonio Sala e ao Prof. Dr. Alisson Dalsasso Corrêa de Souza, que me auxiliaram ao longo deste trabalho.

Aos técnicos de laboratório Arthur e Emerson que me ajudaram na construção da turbina.

Aos demais professores da área de Engenharia Mecânica do IFRS Erechim, pelos ensinamentos e experiências compartilhados ao longo de todo o curso.

E, por fim, ao IFRS Campus Erechim, que me proporcionou uma formação profissional de qualidade.

RESUMO

Dada a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, somados à possível escassez de fontes de energia no futuro e a busca constante por fontes de energia sustentáveis, torna-se extremamente importante o estudo da energia eólica. Este tipo de energia vem ganhando destaque na matriz energética global, por se tratar de uma fonte de energia limpa e considerável inesgotável. Com o aumento do aproveitamento da energia eólica nos últimos anos, o presente trabalho, tem por objetivo principal aplicar um sistema para medição de potência e eficiência de turbinas eólicas de pequeno porte utilizando dados da variação da energia cinética em um determinado período de tempo. Assim, para atingir este objetivo foi construída uma turbina multipás com diâmetro externo de 2500 mm e 18 pás. Para medir as velocidades angulares da turbina foi usado um volante automotivo dentado no eixo da turbina e um sensor de rotação indutivo para fazer a leitura da passagem dos dentes. Além disso, usou-se um anemômetro para medir a velocidade do vento no local. Por fim, foi empregado um sistema de aquisição e processamento de dados para coletar e armazenar essas informações. Através desses dados obtidos, foi possível determinar a potência e o rendimento da turbina a partir da variação da energia cinética em um determinado intervalo de tempo. O sistema estudado mostrou-se eficaz, porém sensível a ventos turbulentos.

Palavras – Chave: Fontes alternativas. Energia eólica. Turbina eólica.

ABSTRACT

Given the growing concern for environmental preservation, the potential scarcity of energy sources in the future, and the ongoing search for sustainable energy sources, the study of wind energy becomes extremely important. This type of energy is gaining prominence in the global energy matrix due to its clean and virtually inexhaustible nature. With the increased utilization of wind energy in recent years, this work aims to apply a system for measuring power and efficiency in small-scale wind turbines using data from kinetic energy variation over a specific period of time. To achieve this objective, a multi-blade turbine with an external diameter of 2500 mm and 18 blades was constructed. Angular velocities of the turbine were measured using a toothed automotive flywheel attached to the turbine shaft and an inductive rotation sensor to read the passage of the teeth. Additionally, an anemometer was used to measure the wind speed at the site. Finally, a data acquisition and processing system was employed to collect and store this information. Through the obtained data, it was possible to determine the power and efficiency of the turbine based on the variation in kinetic energy over a specific time interval. The studied system proved effective, though sensitive to turbulent winds.

Keywords: Alternative sources. Wind energy. Wind turbine.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Barco à vela usado pelos egípcios	16
Figura 2 - Moinho de vento persa com eixo vertical. Em (a) vista geral das paredes do moinho, e em (b) a pedra do moinho localizada abaixo do rotor e as velas.....	16
Figura 3 - Moinho de vento tipo holandês.....	17
Figura 4 - Turbina multipás	18
Figura 5 - Turbina eólica construída na Rússia	19
Figura 6 - Turbina eólica moderna	19
Figura 7 - Ventos de circulação global.....	20
Figura 8 - Camada Limite.....	21
Figura 9 - Fluxo de ar fluindo através de uma área transversal A com velocidade V.....	23
Figura 10 - Gráfico para estimar a densidade do ar em relação à altitude do local e da temperatura ambiente.	25
Figura 11 - Princípio de conversão de energia em uma turbina eólica.....	26
Figura 12 - Turbinas de eixo vertical em (a) imagem do rotor Savonius, e em (b) imagem do rotor Darrieus.....	27
Figura 13 - Turbinas híbridas Savonius-Darrieus.....	27
Figura 14 - Turbinas de eixo horizontal e vertical.....	29
Figura 15 - Perfil do vento em função da extração da energia mecânica	30
Figura 16 - Coeficiente de potência (C_p) versus a razão de velocidade para diferentes tipos de turbinas eólicas.	33
Figura 17 - Turbina multipás (18 pás).....	37
Figura 18 - Turbina multipás e seus componentes	38
Figura 19 - Turbina multipás e seus componentes	39
Figura 20 - Anemômetro Arduino SV10.....	41
Figura 21 - Pro Tune Connect Box – CB 1204	41
Figura 22 - Chicote com conector e sensor de rotação.....	42
Figura 23 - Método para obtenção momento de inércia.....	43
Figura 24 - Momento de inércia do conjunto girante	46
Figura 25 - Local de instalação da turbina	49
Figura 26 - Teste 1 Média - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina	50
Figura 27 - Teste 1 Média - Potência disponível no vento x Potência da turbina.....	51
Figura 28 - Teste 1 Média - Eficiência da turbina.....	51

Figura 29 - Teste 1 Média - Razão de velocidades - TSR.....	52
Figura 30 - Teste 6 Média - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina	52
Figura 31 - Teste 6 Média - Potência disponível no vento x Potência da turbina.....	53
Figura 32 - Teste 6 Média - Eficiência da turbina.....	53
Figura 33 - Teste 6 Média - Razão de velocidades - TSR.....	54
Figura 34 - Teste 1 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina.....	61
Figura 35 - Teste 1 - Potência disponível no vento x Potência da turbina	61
Figura 36 - Teste 1 - Eficiência da turbina	62
Figura 37 - Teste 1 - Razão de velocidades.....	62
Figura 38 - Teste 2 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina.....	63
Figura 39 - Teste 2 - Potência disponível no vento x Potência da turbina	64
Figura 40 - Teste 2 - Eficiência da turbina	64
Figura 41 - Teste 2 - Razão de velocidades.....	65
Figura 42 - Teste 3 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina.....	67
Figura 43 - Teste 3 - Potência disponível no vento x Potência da turbina	67
Figura 44 - Teste 3 - Eficiência da turbina	68
Figura 45 - Teste 3 - Razão de velocidades.....	68
Figura 46 - Teste 4 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina.....	70
Figura 47 - Teste 4 - Potência disponível no vento x Potência da turbina	70
Figura 48 - Teste 4 - Eficiência da turbina	71
Figura 49 - Teste 4 - Razão de velocidades.....	71
Figura 50 - Teste 5 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina.....	72
Figura 51 - Teste 5 - Potência disponível no vento x Potência da turina	73
Figura 52 - Teste 5 - Eficiência da turbina	73
Figura 53 - Teste 5 - Razão de velocidades.....	74
Figura 54 - Teste 6 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina.....	75
Figura 55 - Teste 6 - Potência disponível no vento x Potência da turbina	75
Figura 56 - Teste 6 - Eficiência da turbina	76
Figura 57 - Teste 6 - Razão de velocidades.....	76
Figura 58 - Teste 7 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina.....	77
Figura 59 - Teste 7 - Potência disponível no vento x Potência da turbina	78
Figura 60 - Teste 7 - Eficiência da turbina	79
Figura 61 - Teste 7 - Razão de velocidades.....	79
Figura 62 - Teste 8 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina.....	81

Figura 63 – Teste 8 - Potência disponível no vento x Potência da turbina.....	81
Figura 64 - Teste 8 - Eficiência da turbina	82
Figura 65 - Teste 8 - Razão de velocidades.....	82
Figura 66 - Teste 9 - Velocidade do vento x velocidade periférica da turbina.....	83
Figura 67 - Teste 9 - Potência disponível no vento x Potência da turbina	84
Figura 68 - Teste 9 - Eficiência da turbina	84
Figura 69 - Teste 9 - Razão de velocidades.....	85
Figura 70 - Teste 10 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina.....	86
Figura 71 - Teste 10 - Potência disponível no vento x Potência da turbina	86
Figura 72 - Teste 10 - Eficiência turbina	87
Figura 73 - Teste 10 - Razão de velocidades.....	87
Figura 74 - Modelamento do conjunto girante no software	88
Figura 75 - Volante dentado automotivo 132 dentes.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados teste 1 com a média de intervalos de tempo	50
Tabela 2 - Resultados teste 6 com a média de intervalos de tempo	52
Tabela 3 - Resultados teste 1	60
Tabela 4 - Resultados teste 2	63
Tabela 5 - Resultados teste 3	66
Tabela 6 - Resultados teste 4	69
Tabela 7 - Resultados teste 5	72
Tabela 8 - Resultados teste 6	74
Tabela 9 - Resultados teste 7	77
Tabela 10 - Resultados teste 8	80
Tabela 11 - Resultados teste 9	83
Tabela 12 - Resultados teste 10	85

LISTA DE SÍMBOLOS

E_c	Energia cinética
m	Massa de ar
v	Velocidade do vento
P	Potência disponível no vento
E	Energia cinética do vento
\dot{E}	Fluxo de energia
t	Tempo
\dot{m}	Fluxo de massa de ar
ρ	Massa específica do ar
A	Área da seção transversal
P_v	Potência do vento
R_{ar}	Constante do ar
P_a	Pressão atmosférica
T_k	Temperatura ambiente em kelvin
z	Altitude do local
T	Temperatura ambiente
Q	Vazão do vento que atravessa a turbina
A_e	Área da seção transversal do tubo na entrada do rotor da turbina
A_s	Área da seção transversal do tubo na saída do rotor da turbina
V_e	Velocidade do vento na entrada do tubo
V_s	Velocidade do vento na saída do tubo
C_p	Coefficiente de potência da turbina eólica
$P_{turbina}$	Potência extraída pela turbina eólica
λ	Tip Speed Ratio (TSR)
u	Velocidade tangencial na ponta da pá
ω^*	Velocidade angular da pá da turbina
R	Raio do rotor da turbina
M	Massa do corpo
V	Velocidade
I	Momento de inércia
ω	Velocidade angular do corpo

I_{turb}	Momento de inércia do conjunto girante
ω_{t_2}	Velocidade angular do conjunto girante no tempo 2
ω_{t_1}	Velocidade angular do conjunto girante no tempo 1
ΔE	Varição de energia
Δt	Varição do tempo
η	Eficiência mecânica
A_T	Área da turbina
V_p	Velocidade periférica
D	Diâmetro do rotor da turbina
n	Rotação do conjunto girante

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos Específicos.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Energia eólica.....	15
3.1.1 Histórico da energia eólica	15
3.1.2 Os ventos	20
3.1.2.1 Fatores que influenciam nos ventos	21
3.1.2.2 Potência do vento	21
3.1.3 Turbinas Eólicas	25
3.1.3.1 Turbina de eixo vertical.....	26
3.1.3.2 Turbina eixo horizontal	28
3.1.4 Potência extraída do vento	29
3.1.5 Curva e coeficiente de potência de uma turbina eólica	31
3.1.6 Razão de Velocidades	32
3.2 Energia Cinética, Potência e Eficiência Mecânica	34
3.2.1 Eficiência mecânica.....	35
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1 Materiais.....	37
4.1.1 Turbina	37
4.1.2 Instrumentação para leitura e aquisição de dados	40
4.2 Método	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1 Dados para obtenção dos resultados.....	45
5.1.1 Área da turbina	45
5.1.2 Massa específica do ar.....	45
5.1.3 Momento de inércia de massa do conjunto girante	46
5.1.4 Velocidades angulares instantâneas da turbina e do vento.....	47
5.1.5 Potência fornecida pelo vento	47
5.1.6 Potência extraída do vento pela turbina	48
5.1.7 Rendimento da turbina	48
5.2 Resultados	48

6 CONCLUSÕES	55
7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57
REFERÊNCIAS	58
APÊNDICE	60
Apêndice A – Cálculos e gráficos	60
Apêndice B – Modelamento da turbina multipás no software	88
Apêndice C – Detalhamento do conjunto girante	89
Apêndice D – Volante dentado automotivo	96

1 INTRODUÇÃO

A energia dos ventos é aproveitada pelo ser humano desde os primórdios da civilização, sendo essencial para o desenvolvimento da sociedade. Inicialmente foi utilizada como energia mecânica para impulsionar barcos à vela e, mais tarde, nos moinhos de vento, que aproveitavam esta energia para a moagem de grãos e bombeamento de água. Com a descoberta da eletricidade houve uma nova aplicação para a energia dos ventos. Os antigos moinhos de ventos, hoje conhecidos como turbinas eólicas, passaram a ser empregados para acionar geradores e assim produzir energia elétrica. Esses dispositivos evoluíram para o que se conhece hoje como aerogeradores (MOREIRA, 2017).

Nos últimos anos, houve um grande aumento do uso da energia, em especial a elétrica. Com o uso contínuo de energia de formas convencionais, ou seja, não-sustentáveis, se tornou clara a ligação entre a queima de combustíveis fósseis e o aumento das temperaturas médias do planeta. Neste sentido, matrizes energéticas mais limpas e sustentáveis tornam-se cada vez mais necessárias.

A preocupação com a preservação do ambiente natural, somados à possível escassez de fontes de energia no futuro, geram uma busca incessante por métodos de geração de energia proveniente de fontes sustentáveis. A energia eólica, uma das principais alternativas, tem sido cada vez mais difundida, dado seu grande crescimento na indústria e sua capacidade, visto que se destaca como uma das fontes mais promissoras no âmbito das energias sustentáveis, devido aproveitar a força do vento, um recurso considerado inesgotável. Em virtude disso, o desenvolvimento de aerogeradores vem em uma crescente, e junto com isso, a busca por aprimorar sua eficiência e alcançar resultados mais eficientes.

De acordo com Marques (2004), a energia eólica é uma das fontes de energia renováveis existentes que mais cresce nos últimos anos devido à várias circunstâncias, como incentivos governamentais, o alto grau de desenvolvimento desta tecnologia e sua confiabilidade. O progresso atingido em grande escala pela indústria eólica foi alcançado graças ao crescimento histórico desta tecnologia, que data desde os moinhos de vento até as modernas turbinas eólicas usadas nos tempos atuais.

Segundo ARAÚJO e WILLCOX (2018), o Brasil possui um potencial eólico estimado em torno de 300 GW. A energia eólica com o decorrer dos anos veio ganhando mais espaço no país, principalmente depois de 2009, com o início dos leilões de energia eólica e o surgimento de novas tecnologias. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, 2023). O país

teve um grande crescimento nesta última década, saltando de 1GW em 2011 para 21 GW em janeiro de 2022. Hoje, o vento se tornou a segunda maior fonte de geração de energia no país, representando 11% da matriz elétrica (GWEC 2022).

No Brasil, o primeiro aerogerador veio a ser instalado no ano de 1992, no arquipélago de Fernando de Noronha. Esta turbina eólica de 75 kW chegou a gerar 10% da energia elétrica consumida na ilha. Este projeto foi resultado da parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), com auxílio do financiamento do instituto de pesquisas dinamarquês Folkecenter. Nos dez anos subsequentes, a energia eólica não teve um crescimento, devido à falta de políticas incentivadoras e o alto custo dessa tecnologia. Este cenário só começou a mudar quando foi criado o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), que incentivou o desenvolvimento das fontes renováveis na matriz energética, tornando o setor mais viável para investimento, abrindo caminho para fixação da indústria de componentes e turbinas eólicas no país (ANEEL, 2005; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, 2023).

O funcionamento de uma turbina eólica consiste em transformar a energia cinética dos ventos em energia mecânica em forma de rotação de um eixo. Este mesmo eixo também pode ser ligado diretamente ou através de uma caixa de transmissão a um gerador, que transforma a energia mecânica no eixo em energia elétrica. Porém, nem toda a energia que o vento entrega é convertida em energia mecânica.

Conforme estabelecido pela Lei de Betz, a eficiência máxima alcançável por uma turbina eólica é de 59,3%, isto significa que grande parte da energia entregue pelo vento não pode ser totalmente aproveitada pela turbina, pois se toda a energia do vento fosse entregue a turbina, a velocidade do vento após passar por ela seria reduzida a zero, já que toda a energia teria sido transferida para a turbina. Contudo, na prática, isso não ocorre, visto que parte da energia do vento é dissipada ao passar pela turbina, resultando apenas em uma fração dessa energia sendo efetivamente capturada pela turbina (LIMA, 2015). Além disso, a maioria das turbinas eólicas não alcançam essa eficiência, somando ainda perdas em transmissões e no gerador a transformar essa energia mecânica em elétrica, visto que, essas turbinas não alcançam as rotações necessárias para bom rendimento dos geradores, havendo necessidade de um sistema de multiplicação, o qual também é responsável por parte dessas perdas.

Diante disso, é de suma importância conhecer a eficiência das turbinas eólicas, para ter dados essenciais para projetos futuros e para determinar a quantidade de energia que pode

ser gerada por cada turbina. Porém não é uma tarefa fácil medir a eficiência de uma turbina eólica em virtude da variação do vento, da complexidade do sistema e do ambiente a onde for instalada.

A eficiência das turbinas eólicas pode ser medida de diferentes formas. Clemente e Junior (2020), avaliaram a eficiência energética de uma turbina eólica a partir de um aerogerador em um túnel de vento. Foram feitas medição da velocidade de entrada e saída do vento e da tensão e a corrente gerada. A partir disso foi relacionada a potência eólica com a potência elétrica. Já Lopes (2011), calculou a eficiência a partir da variação do torque gerado por um sistema de frenagem, utilizando um transdutor de torque e a medição da rotação.

O presente trabalho, porém, visa encontrar este rendimento por uma análise diferente, através da resistência ao movimento, especificamente pela inércia, onde analisa-se a eficiência da turbina em sua partida, no caso em seu ganho de velocidade angular em um determinado intervalo de tempo. Assim sendo, foi necessário construir uma turbina e montar o equipamento para realização das medições.

Os elementos destacados acima justificam e evidenciam a relevância deste trabalho, destacando os benefícios decorrentes da adoção da energia eólica como uma fonte renovável para geração de eletricidade, especialmente ao considerar a implementação de aerogeradores de pequeno porte em sistemas elétricos residências, com o intuito de gerar eletricidade de uma forma sustentável. No próximo capítulo seguem-se os objetivos deste trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Aplicar um sistema para medição de potência e eficiência de turbinas eólicas de pequeno porte utilizando dados da variação da energia cinética em um determinado período de tempo.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar os diferentes tipos de turbinas eólicas;
- Construir uma turbina eólica para fazer um estudo de caso;
- Construir um sistema para medir a potência e o rendimento aerodinâmico da turbina eólica;
- Medir a eficiência e potência da turbina construída.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De modo a contextualizar o trabalho, este capítulo abordará as definições de energia eólica e o processo de geração dos ventos, além de explicar como determinar sua potência. Em seguida será apresentada a história e a evolução das turbinas eólicas, suas características e conceitos básicos. Além disso, será feita uma revisão sobre energia cinética e a forma de determinar a potência a partir da variação dessa energia ao longo do tempo, bem como o cálculo da eficiência mecânica.

3.1 Energia eólica

A energia eólica é obtida a partir da energia cinética (do movimento) gerada pela migração das massas de ar causada pelas diferenças de temperatura na superfície do planeta. (ANEEL, 2008). Sua origem é proveniente da radiação solar, que, ao aquecer uma determinada área de terra, gera variações de temperatura nas massas de ar. Essas mudanças na temperatura provocam uma alteração em suas propriedades, levando-as a se deslocar e, como resultado, gerando os ventos (NUNES, 2015). Esse aquecimento desigual é resultado, entre outros fatores, da forma como os raios solares incidem e dos movimentos da Terra (DUTRA, 2008).

O aproveitamento da energia eólica é feito de várias formas. Uma delas é por meio da utilização de turbinas eólicas que transformam a energia dos ventos em energia mecânica. Esse aproveitamento ocorre pelo contato do vento com as pás da turbina eólica. À medida que essas pás giram, geram energia mecânica que podem acionar o rotor de um gerador elétrico, resultando na produção de eletricidade. A quantidade de energia mecânica transferida, e, portanto, o potencial de geração de energia elétrica, está diretamente vinculado à densidade do ar, à área coberta pela rotação das pás e à velocidade do vento (ANEEL, 2008).

3.1.1 Histórico da energia eólica

A energia eólica tem sido utilizada pelo ser humano desde os primórdios da civilização, desempenhando um papel crucial no desenvolvimento da sociedade. Inicialmente, essa energia foi empregada como força mecânica para mover barcos à vela em rios e lagos, e posteriormente, para navios no mar. A Figura 1 ilustra os barcos à vela usados pelos egípcios,

representando a primeira referência histórica ao uso extenso da energia dos ventos (MOREIRA, 2017; RAGHEB, 2019).

Figura 1 - Barco à vela usado pelos egípcios



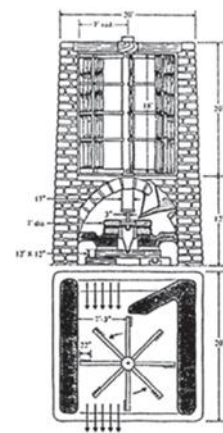
Fonte: Ragheb (2019).

Após o surgimento dos barcos à vela, a primeira referência histórica confiável indica que a energia eólica começou a ser usada para a moagem de grãos e o bombeamento de água com o aparecimento dos moinhos de vento na Pérsia, por volta de 200 a.C. Esses moinhos eram bem primitivos, apresentando baixa eficiência e caracterizavam-se por ser de eixo vertical, como ilustrado na Figura 2 (FADIGAS, 2011).

Figura 2 - Moinho de vento persa com eixo vertical. Em (a) vista geral das paredes do moinho, e em (b) a pedra do moinho localizada abaixo do rotor e as velas.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Fadigas (2011).

Alguns séculos depois, na Europa, surgiram moinhos de ventos de eixo horizontal. A primeira evidencia documentada desses moinhos, data de 1180, quando surgiram em Duchy, Normandia. Os moinhos primitivos de eixo vertical continuaram a ser usados até o século XII, quando os moinhos de vento de eixo horizontal do tipo holandês passaram a ser amplamente adotados em diversos países da Europa, tais como França, Inglaterra e Holanda (FADIGAS, 2011).

No continente europeu, os moinhos de vento exerceram uma forte e decisiva influência na economia agrícola dos séculos 16 e 17. Além de triturar grãos, na Holanda, auxiliaram na drenagem de terras, tendo em vista que parte das terras holandesas ficavam abaixo do nível do mar. A Figura 3, mostra um moinho de vento tipo holandês.

Figura 3 - Moinho de vento tipo holandês



Fonte: Fadigas (2011).

Com a introdução da máquina a vapor no século 19, os moinhos de vento tiveram um declínio notável, principalmente na Europa. No entanto, nos Estados Unidos, houve uma expansão do seu uso devido à necessidade de fornecer energia para bombeamento de água em regiões que não possuíam reservas hídricas. Dessa forma, esses equipamentos passaram por diversas melhorias, resultando no desenvolvimento de equipamentos mais simples, leves, mais

eficientes e menos custosos, como exemplificado na Figura 4, que representa uma turbina multipás empregado em áreas rurais para bombeamento d'água (FADIGAS, 2011).

Figura 4 - Turbina multipás



Fonte: Moreira (2017).

No decorrer da segunda metade do século XIX, surgiram os aerogeradores, que aproveitavam a força dos ventos para gerar eletricidade. Esses sistemas eram utilizados principalmente em áreas rurais, uma vez que essas regiões careciam de acesso à eletricidade, visto que não era viável estender a rede elétrica até esses locais. Um exemplo desses aerogeradores pode ser visto Figura 5 (FADIGAS, 2011).

Figura 5 - Turbina eólica construída na Rússia



Fonte: HAU (2013).

Depois da Segunda Guerra Mundial, continuou-se buscando aprimorar ainda mais a eficiência dos aerogeradores, visando um aproveitamento mais eficaz da energia eólica. Novos estudos abrangendo a aerodinâmica e o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais, e a crescente preocupação com preservação do meio ambiente nos tempos atuais, desempenharam um papel fundamental na evolução das turbinas eólicas ao decorrer dos anos (FADIGAS, 2011). A Figura 6 abaixo ilustra uma turbina eólica moderna para geração de eletricidade.

Figura 6 - Turbina eólica moderna



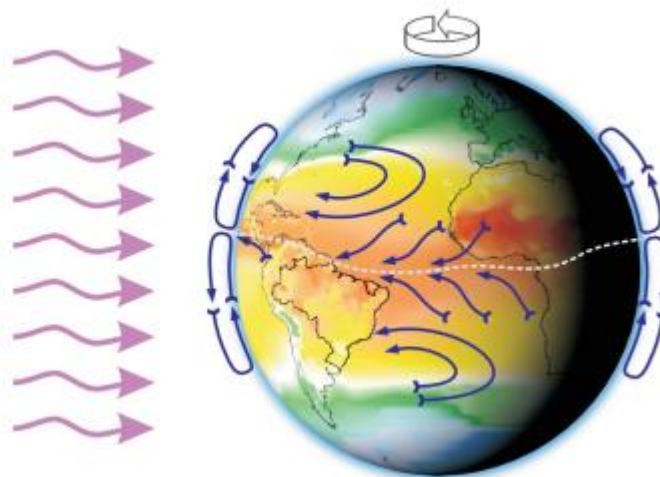
Fonte: Pinto (2012).

3.1.2 Os ventos

“O vento é o ar em movimento provocado pelo aquecimento desigual da terra” (CUSTÓDIO, 2013, p.7).

A circulação geral dos ventos tem sua origem diretamente relacionada à radiação solar e aos movimentos de rotação da Terra. A inclinação do eixo de rotação terrestre em relação ao plano de órbita em torno do sol, faz com que a intensidade da radiação solar seja maior nas regiões equatoriais em comparação com as regiões polares. Conseqüentemente, o ar quente presente nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais fria que se move das regiões polares (DUTRA, 2008). Essa disparidade no aquecimento é responsável pelo movimento das massas de ar (CUSTÓDIO, 2013). Essa radiação aquece a superfície terrestre de maneira desigual, provocando variações de pressão, temperatura e densidade, desencadeando, conseqüentemente, a formação dos padrões de circulação global dos ventos, como demonstra a Figura 7 (FADIGAS, 2011).

Figura 7 - Ventos de circulação global

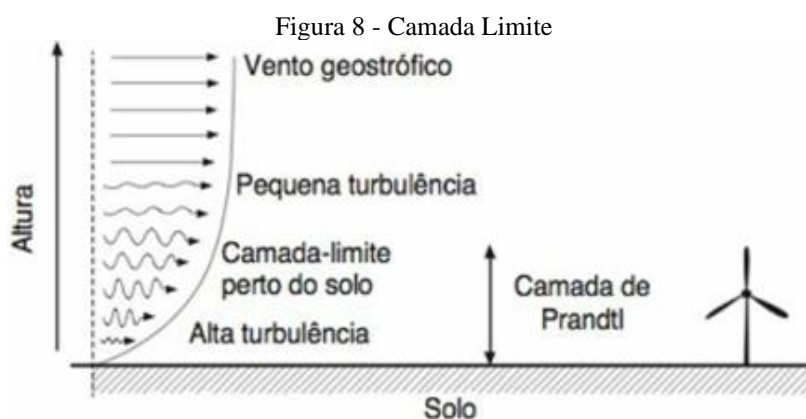


Fonte: Amarante, O. A. et al (2001).

De acordo com Pinto (2012), aproximadamente de 3 a 5% da radiação solar que atinge a Terra é convertida em energia cinética que seja capaz de provocar movimentos na atmosfera, por meio da diferença de temperaturas, estabelecendo a base para a energia eólica. O potencial para transformar essa energia eólica em outras formas de energia não está limitada por suas fontes, uma vez que estas são inesgotáveis e constantes. A verdadeira limitação reside no aspecto econômico.

3.1.2.1 Fatores que influenciam nos ventos

Segundo Fadigas (2011), os ventos sofrem influência de diversos parâmetros, como obstáculos próximos, rugosidades do terreno, a existência de colinas e depressões. As massas de ar que circulam a Terra sofrem atrito ao entrarem em contato com a superfície terrestre, o que gera uma força contrária ao fluxo mássico. Essa força oposta diminuiu à medida que a altitude aumenta, até o ponto chamado de camada limite. Além desse ponto, há uma região chamada atmosfera livre, onde o vento flui em linhas de pressão constantes, denominadas de isóbaras (PINTO, 2012). A Figura 8 ilustra um esquema mostrando a camada limite, percebe-se que quanto mais próximo ao solo maior será a turbulência do vento.



Fonte: Pinto (2012).

Em turbinas de pequeno porte, como o analisado neste estudo, esses elementos desempenham um papel significativo, uma vez que modificam a forma como o ar flui pelas pás, causando turbulência e conseqüentemente perda de potência.

3.1.2.2 Potência do vento

“A energia eólica é a energia cinética do ar em movimento, o vento” (CUSTÓDIO, 2011, p.33).

A energia cinética de uma massa de ar em movimento pode ser calculada pela equação tradicionalmente conhecida como:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (3.1)$$

Onde:

E_c = energia cinética [J];

m = massa de ar [Kg];

v = velocidade do vento [m/s].

A potência que pode ser extraída do vento é representada pela derivada da energia no tempo, dada por:

$$P_v = \dot{E} = \frac{dE}{dt} = \frac{\dot{m} \cdot v^2}{2} \quad (3.2)$$

Onde:

P_v = potência disponível no vento [W];

E = energia cinética do vento [J];

\dot{E} = fluxo de energia [J/s];

t = tempo [s];

\dot{m} = fluxo de massa de ar [kg/s];

v = velocidade do vento [m/s].

O fluxo de massa é representado através da seguinte equação:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad (3.3)$$

Onde:

\dot{m} = fluxo de massa de ar [kg/s];

v = velocidade do vento [m/s];

ρ = massa específica do ar [kg/m³];

A = área da seção transversal [m²].

Ao substituir a equação 3.3 em 3.1, encontra-se a potência disponível no vento que passa através da área de uma seção transversal A , representada na Figura 9. Essa potência é definida como:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.4)$$

Onde:

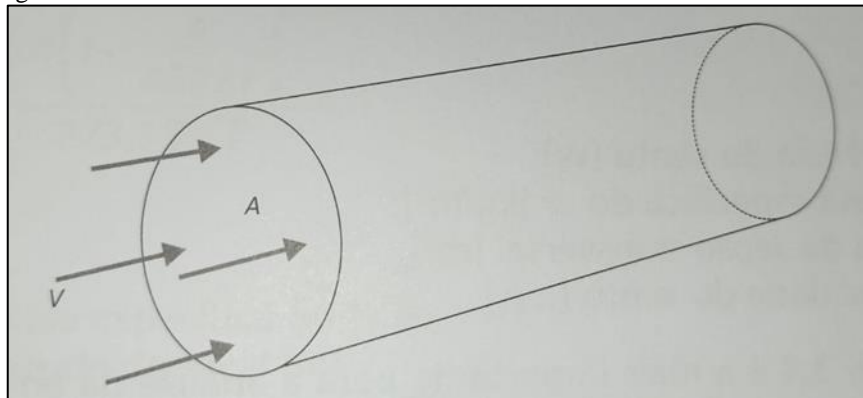
P_v = potência disponível no vento [W];

ρ = massa específica do ar [kg/m^3];

v = velocidade do vento [m/s];

A = área da seção transversal [m^2].

Figura 9 - Fluxo de ar fluindo através de uma área transversal A com velocidade V .



Fonte: Custódio (2011).

A equação 3.4 é a mais importante na análise da energia eólica e pode ser expressa em termos de área, resultando na definição da densidade de potência DP :

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (3.5)$$

Esta equação expressa a potência disponível no vento por unidade de área, em relação a velocidade do vento (v) e à massa específica do ar (ρ) no local.

Com base nas equações 3.4 e 3.5, observa-se uma relação direta entre a potência disponível no vento e a massa específica do ar. Para calcular a densidade do ar, pode-se aplicar a lei de estado dos gases perfeitos conforme descrito na equação a seguir:

$$\rho = \frac{P_a}{R_{ar} \cdot T_k} \quad (3.6)$$

Onde:

ρ = massa específica do ar [kg/m³];

R_{ar} = constante do ar [287 J/kg. K];

P_a = pressão atmosférica [Pa];

T_k = temperatura ambiente em kelvin [K].

Conforme evidenciado pela equação acima, a massa específica do ar é influenciada tanto pela temperatura ambiente quanto pela pressão atmosférica, duas variáveis que são afetadas pela altitude do local. Assim, para estimar a massa específica do ar, ou densidade, ρ , em função da altitude do local e da temperatura ambiente, utiliza-se a equação a seguir:

$$\rho \cong \frac{353,4 \cdot \left(1 - \frac{z}{45271}\right)^{5,2624}}{273,15 + T} \quad (3.7)$$

Onde:

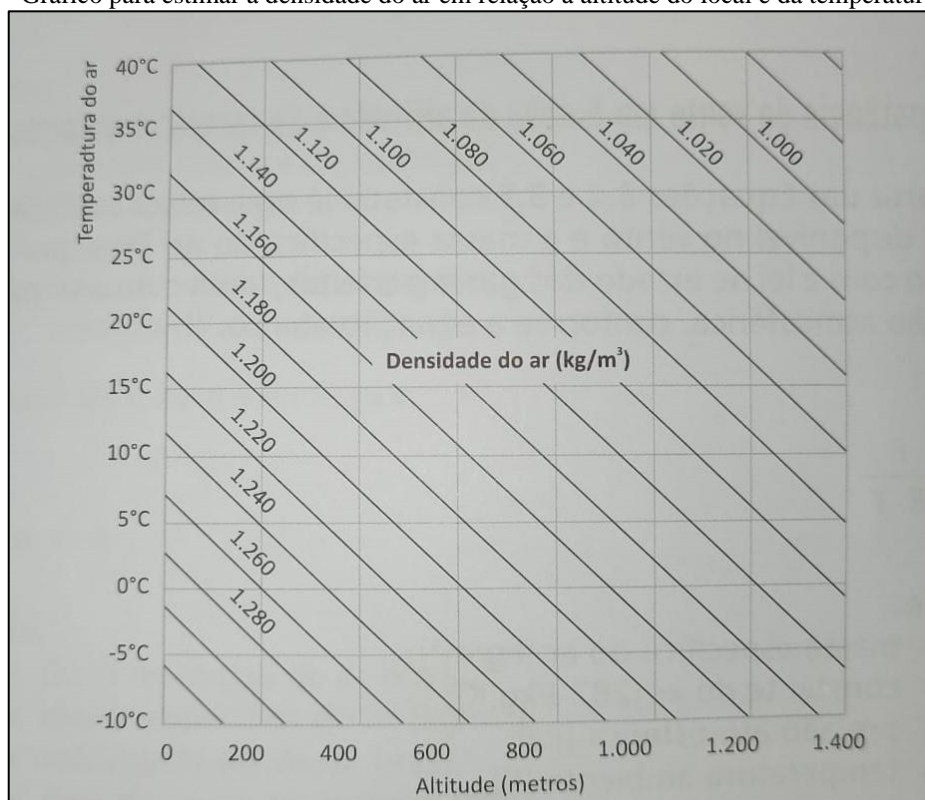
ρ = massa específica do ar [kg/m³];

z = altitude do local (m);

T = temperatura ambiente [°C].

O gráfico da Figura 10, a seguir, pode ser utilizado para estimar densidade do ar, ou massa específica, em função da altitude do local e da temperatura do ar. Este gráfico foi elaborado com base na Equação 3.7, que considera o ar seco.

Figura 10 - Gráfico para estimar a densidade do ar em relação à altitude do local e da temperatura ambiente.



Fonte: Custódio (2011).

3.1.3 Turbinas Eólicas

Turbinas eólicas, ou aerogeradores são equipamentos que absorvem parte da energia cinética do vento e a transformam em energia mecânica. Geralmente essas máquinas são empregadas para geração de energia elétrica através de acoplamentos com geradores, podendo ser essa transmitida à rede da distribuição ou a baterias. Esse processo é exemplificado na Figura 11 (PINTO, 2012). Além do mais, também podem ser aplicadas em sistemas de bombeamento de água, moagem de grãos e outros sistemas mecânicos, porém o seu funcionamento dependem das condições do vento, sobre os quais nenhuma ação é possível.

De acordo com Wenzel (2007), as turbinas eólicas podem ser classificadas quanto à sua forma construtiva:

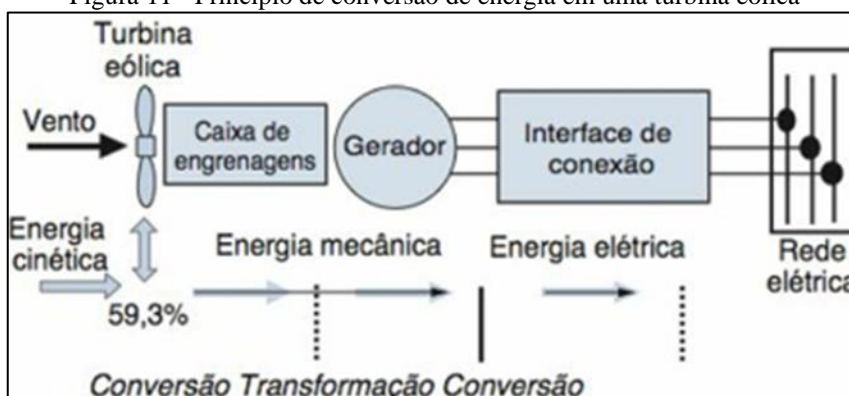
- Turbinas eólicas de eixo horizontal;
- Turbinas eólicas de eixo vertical.

e quanto à sua potência nominal:

- Pequeno porte (até 50kW de potência);

- Médio porte (potência de 50 a 1000 kW);
- Grande porte (acima de 1MW de potência).

Figura 11 - Princípio de conversão de energia em uma turbina eólica



Fonte: Pinto (2012).

3.1.3.1 Turbina de eixo vertical

Na definição de Pinto (2012) são turbinas que possuem o seu eixo posicionado na vertical. São consideradas os projetos mais antigos de rotores eólicos, embora durante muito tempo tenham sido construídos apenas como rotores de arrasto. Atualmente, existem turbinas de eixo vertical que operam pelo princípio da sustentação, como a turbina Darrieus. Essa turbina possui um perfil aerodinâmico projetado de maneira semelhante às asas dos aviões. Apresentam uma Razão de Velocidade de Rotação, também chamada de TSR (*Tip Speed Ratio*) mais elevado em comparação com as turbinas Savonius. Isso as torna mais eficientes, porém possuem dificuldade de partida. Por outro lado, a turbina Savonius, que se baseia principalmente na força de arrasto, é acionada pela pressão do ar sobre suas pás, girando a uma velocidade mais baixa em comparação com outros modelos de turbinas eólicas, mas, em contrapartida, é considerada a menos eficiente (MÜLLER, 2015).

Esses modelos não apresentam muitas vantagens, sendo suas principais, a questão de não precisarem de nenhum tipo de controle de ajuste para se manter na direção do vento e de possuir uma manutenção fácil, em virtude, do maquinário pesado contido na nacela estar próximo ao solo. Sua principal desvantagem é o fator de suas pás ficarem relativamente perto do solo, onde a velocidade do vento é bem menor, além de ser mais fracos e turbulentos.

A figura 12, exemplifica os principais modelos de turbinas de eixo vertical usados atualmente, onde podem ser utilizados de forma individual, ou de forma híbrida, como podemos observar na Figura 13.

Figura 12 - Turbinas de eixo vertical em (a) imagem do rotor Savonius, e em (b) imagem do rotor Darrieus



(a) (b)

Fonte: Adaptado de Portal Energia (2016).

Figura 13 - Turbinas híbridas Savonius-Darrieus



Fonte: Pinto (2012).

3.1.3.2 Turbina eixo horizontal

De acordo com Hau (2013), as turbinas de eixo horizontal foram projetadas com base em conceitos das hélices, esse formato vem dos antigos moinhos de ventos até as turbinas modernas atuais.

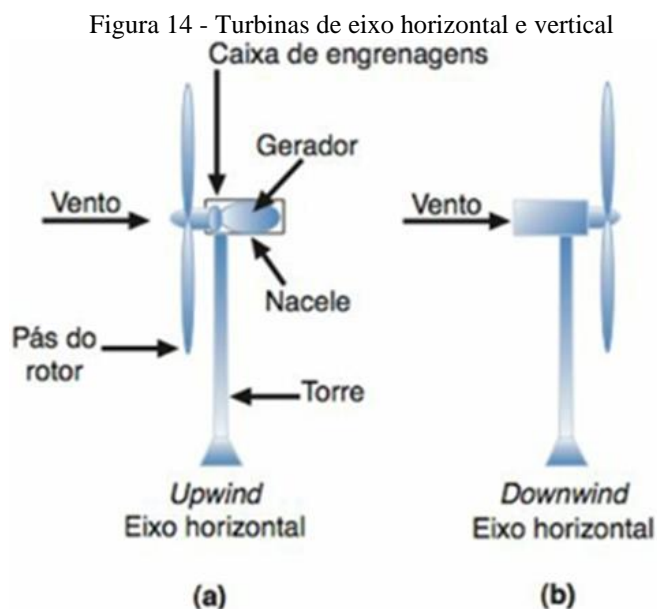
Conforme Pinto (2012), esses modelos se destacam pelo controle da velocidade do rotor e da potência gerada, realizado por meio do ajuste do ângulo das pás. Esse mecanismo não só otimiza o desempenho da turbina, como também oferece a proteção mais eficaz contra o excesso de velocidade, especialmente em turbinas de grande porte. Além disso, o formato das pás do rotor pode ser aprimorado aerodinamicamente para alcançar maior eficiência.

Ainda conforme o autor, esse modelo de turbina oferece várias vantagens importantes. Primeiramente, por possuir uma altura de torre mais elevada permite que a turbina tenha acesso a ventos de maior velocidade, o que melhora a sua eficiência. Além disso, o ajuste do ângulo de passo das pás proporciona um controle mais preciso sobre o desempenho da mesma. Por fim, sua maior eficiência é garantida pelo fato de que as pás estão orientadas perpendicularmente ao vento, o que permite capturar a máxima energia disponível.

As turbinas de eixo horizontal também apresentam algumas desvantagens. Uma delas é a dificuldade na instalação, especialmente devido à altura elevada da torre. Além do mais, o transporte dos equipamentos pode ser complicado, dada a dimensão e o peso das peças. Outra limitação é a necessidade de um sistema de controle para girar as pás em direção ao vento, o que aumenta a complexidade ao projeto. Outro ponto é que a construção da torre é complexa, visto que precisa suportar o peso considerável das pás e do cubo (PINTO, 2012).

Diante dessas vantagens apresentadas, fica claro o motivo da superioridade desses modelos na produção de energia elétrica. Essas turbinas podem ser classificadas em dois tipos, *upwind* e *downwin*. Na *downwind* o vento incide na parte traseira da área de varredura da turbina, passando pela nacele primeiro, representada na ilustração (b) da Figura 14, essa máquina possui a vantagem de não ter um sistema de orientação, se adaptando conforme a direção do vento, porém sofre maiores ruídos e flexões nas pás em virtude da sombra da torre, que faz com que essas pás não recebam um fluxo contínuo de ar. As turbinas *upwind*, representada na ilustração (a) da Figura 14, são mais complexas por necessitarem de um sistema de orientação, mas em contrapartida funcionam mais suavemente e fornecem mais potência.

Não se sabe ao certo, qual desses modelos de turbinas de eixo horizontal seja melhor, entretanto, a turbina mais utilizada é do tipo *upwind*, devido fornecer uma potência maior (PINTO, 2012).



Fonte: Pinto (2012).

3.1.4 Potência extraída do vento

Conforme Benito (2012 *apud* PASA e PINTO, 2013) a geração de energia em um conversor eólico é influenciada pela forma como as pás interagem com os ventos. As correntes de ar em movimento apresentam três fatores que determinam a energia aproveitável: a velocidade, a direção e a densidade.

A conversão de energia cinética do vento em potência mecânica possui algumas limitações, o que significa que a turbina eólica não conseguirá converter toda a energia disponível do vento, aproveitando apenas uma parte desta energia (PINTO, 2012).

De acordo com Fadigas (2011), a equação 3.4 descreve a potência contida nos ventos, também conhecida como potência eólica, que é uma função da massa específica do ar, da área de captação e da velocidade do vento ao cubo. A velocidade mencionada refere-se ao vento não perturbado, ou seja, aquele que se aproxima das pás do rotor antes de encontra-las. Quando esse vento encontra um obstáculo no seu caminho, como as pás do rotor, o seu perfil é alterado e parte da energia do vento será convertida em energia mecânica no eixo da turbina, resultando na criação de um torque e rotação do eixo.

Para explicar esse fenômeno, deve-se basear na equação da continuidade de Bernoulli, que define que a vazão de fluido é constante em diferentes pontos ao longo do fluxo. Em outras palavras, o princípio de Bernoulli nos informa que, para um aumento na velocidade do fluido, ocorre uma diminuição da pressão ou da energia potencial desse fluido, algo que acontece simultaneamente para um fluido sem viscosidade (PINTO, 2012). Assim, tem-se que:

$$Q = A_e \cdot V_e = A_s \cdot V_s \quad (3.8)$$

Onde:

Q = vazão do vento que atravessa a turbina [m^3/s];

A_e = área da seção transversal do tubo na entrada do rotor da turbina [m^2];

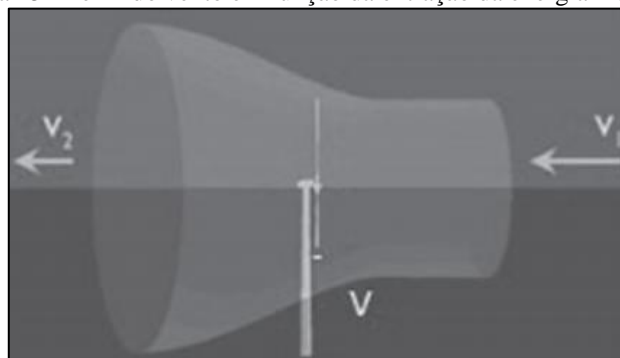
A_s = área da seção transversal do tubo na saída do rotor da turbina [m^2];

V_e = velocidade do vento na entrada do tubo [m/s];

V_s = velocidade do vento na saída do tubo [m/s].

Portanto, à medida que a velocidade do vento diminui após atravessar a turbina, a área ocupada pelo fluxo de ar aumenta, ou seja, todo o fluxo de massa de ar que entra no conversor eólico é igual ao que dele sai. Se a velocidade do ar é menor na saída, esse ar ocupará uma seção transversal maior. Assim, a potência mecânica que o conversor extrai do fluxo de ar é a diferença entre a potência do fluxo de ar antes e após sua passagem pelo conversor. A Figura 15 exemplifica o perfil do vento ao passar pelo aerogerador como um exemplo desse fenômeno (FADIGAS, 2011).

Figura 15 - Perfil do vento em função da extração da energia mecânica



Fonte: Adaptado de Fadigas (2011).

Segundo de Custódio (2011), se o vento perder muita velocidade atrás do rotor, o ar fluirá ao redor da área do rotor em vez de atravessá-lo. Dessa forma, a quantidade máxima de potência que uma turbina eólica pode extrair do vento é limitada pela velocidade do vento na saída do rotor eólico.

Em 1919, o físico alemão Albert Betz estudou e provou matematicamente que nenhuma turbina eólica pode converter mais do que 16/27 ou 59,3%, da energia cinética contida no vento em potência mecânica, ou seja, se não houver perdas no processo de extração de energia do vento, o rendimento máximo de uma turbina eólica é 59,3%. Esse princípio é conhecido como Limete de Betz ou a Lei de Betz (LIMA, 2015).

3.1.5 Coeficiente de potência de uma turbina eólica

De acordo com Fadigas (2011) o coeficiente de potência C_p define-se pela relação entre a potência extraída do vento pela turbina e a potência disponível no vento. Ele depende diretamente das velocidades de entrada e saída. O valor ideal do coeficiente de potência é alcançado quando a velocidade de saída for um 1/3 da velocidade de entrada, o que corresponde ao Limite de Betz (HAU, 2013). Diante disso, o coeficiente de potência pode ser determinado utilizando-se a equação abaixo:

$$C_p = \frac{P_{\text{Turbina}}}{P_v} = \frac{P_{\text{turbina}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \quad (3.9)$$

Onde:

C_p = coeficiente de potência da turbina eólica [adimensional];

P_{Turbina} = potência extraída pela turbina eólica [W];

P_v = potência disponível no vento [W];

A potência eólica teórica difere consideravelmente da potência real, pois nem toda a energia que o vento entrega é aproveitada pela turbina, visto que se assim fosse, a velocidade do vento após passar por ela seria reduzida a zero, já que toda a energia teria sido transferida para a turbina, uma vez que o vento após deixar a turbina apenas perde velocidade, então este

aproveitamento nunca chegar a 100% e sim no máximo a 59,3% conforme mencionado anteriormente pela Lei de Betz.

3.1.6 Razão de Velocidades

A razão de velocidades está associada à eficiência da turbina eólica, em virtude de influenciar diretamente na eficiência da conversão da energia eólica em energia mecânica ou elétrica.

A razão de velocidade é também conhecida como *Tip Speed Ratio* (TSR), que representa a relação da velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento. De acordo com Custódio (2013), é calculada a partir da comparação entre a velocidade tangencial na ponta da pá do rotor e a velocidade do vento que atinge a turbina, expressa pela equação 3.10:

$$\text{TSR} = \lambda = \frac{u}{v} = \frac{\omega^* \cdot R}{v} \quad (3.10)$$

Onde:

λ = Tip Speed Ratio (TSR) [admissional];

u = velocidade tangencial na ponta da pá [m/s];

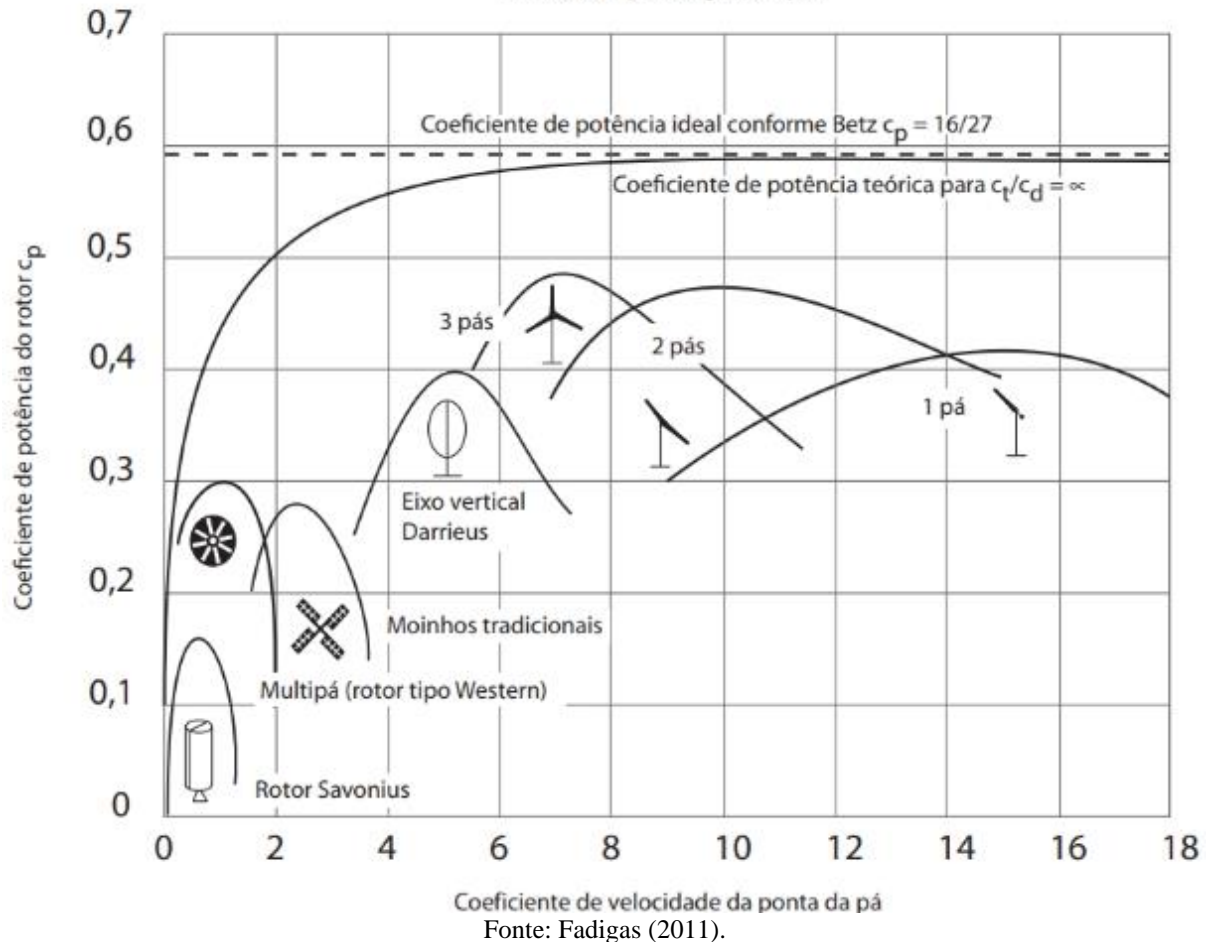
v = velocidade do vento [m/s];

ω^* = velocidade angular da pá da turbina [rad/s];

R = raio do rotor da turbina [m].

A Figura 16, ilustra a curva do coeficiente de potência versus a razão de velocidade para diferentes modelos de turbinas eólicas.

Figura 16 - Coeficiente de potência (C_p) versus a razão de velocidade para diferentes tipos de turbinas eólicas.
Número de pás/diagrama $c_p-\lambda$



No gráfico acima, o eixo vertical representa o coeficiente de potência (C_p), enquanto o eixo horizontal representa a razão de velocidades ou *Tip Speed Ratio* (TSR). A curva resultante mostra como o coeficiente de potência varia à medida que a razão de velocidade muda. Existe um ponto específico no gráfico onde o C_p atinge o seu valor máximo, indicando a máxima eficiência de conversão de energia para aquele modelo de turbina específico. Este ponto corresponde ao *Tip Speed Ratio* (TSR) ideal para operação da turbina. Estabelecer esse ponto é crucial, visto que uma razão de velocidade baixa, significa que a turbina está girando muito devagar em relação à velocidade do vento, resultando em uma baixa eficiência, devido ao vento não estar sendo utilizado de forma otimizada. Por outro lado, quando se tem uma razão de velocidade elevada, indica que a turbina está girando muito rápida, fazendo com que o vento passe pelas pás sem ser capturado de maneira eficiente, acarretando na redução do coeficiente de potência. Por essa razão, é importante determinar este fator para maximizar o

rendimento da turbina, garantindo que a energia disponível no vento seja aproveitada da melhor forma possível.

A potência gerada pela passagem do vento na turbina neste estudo será calculada a partir da variação da energia cinética em um determinado período de tempo. No próximo item será abordado o conceito de energia cinética de rotação e a determinação potência a partir da variação desta energia pelo tempo.

3.2 Energia Cinética, Potência e Eficiência Mecânica

A energia cinética é a energia associada ao estado de movimento de um objeto. Quanto mais rápido o objeto se move, maior é a energia cinética. Se o objeto estiver em repouso, a energia cinética é nula (HALLIDAY, 2023).

Segundo Beer (*et al.*,2019), a energia cinética é composta por duas partes: uma originada pelo movimento de translação do corpo e outra pelo movimento de rotação do mesmo corpo. Isso é representado por meio da equação a seguir:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \dot{V}^2 + \frac{1}{2} \cdot \bar{I} \cdot \omega^2 \quad (3.11)$$

Onde:

E_c = Energia Cinética [J];

M = Massa do corpo [Kg];

V = Velocidade [m/s];

I = Momento de inércia [Kgm²];

ω = Velocidade angular do corpo [rad/s²].

De acordo com Norton (2011), a energia cinética abrange somente uma parte de sua expressão quando se trata de um movimento rotacional. Diante disso, a energia cinética de rotação pode ser definida conforme a seguinte equação:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \bar{I} \cdot \omega^2 \quad (3.12)$$

Para o cálculo da potência pode-se utilizar a variação da energia cinética, sendo:

$$\Delta E = \left(I_{\text{turb}} \cdot \left(\frac{(\omega_{t_2})^2}{2} \right) - I_{\text{turb}} \cdot \left(\frac{(\omega_{t_1})^2}{2} \right) \right) \text{ [J]} \quad (3.13)$$

Onde:

ΔE = variação de energia [J];

I_{turb} = momento de inércia do conjunto girante [kg.m²];

ω_{t_2} = velocidade angular do conjunto girante no tempo 2 [rad/s];

ω_{t_1} = velocidade angular do conjunto girante no tempo 1 [rad/s].

Dividindo a equação 3.13 pela variação do tempo em um determinado intervalo, obtém-se a potência absorvida pela turbina, de acordo com a equação abaixo:

$$P_{\text{turbina}} = \left(\frac{\Delta E}{\Delta t} \right) \text{ [W]} \quad (3.14)$$

Onde:

Δt = variação do tempo [s].

3.2.1 Eficiência mecânica

Conforme Beer (*et al.*,2019), a eficiência mecânica de uma máquina, é calculada como a razão entre o trabalho realizado pela máquina (trabalho de saída) e o trabalho fornecido à máquina (trabalho de entrada), como podemos observar na equação a seguir:

$$\eta = \frac{\text{potência de saída}}{\text{potência de entrada}} \quad (3.15)$$

Onde:

η = eficiência mecânica [adimensional]

Quando uma máquina é utilizada para converter energia mecânica em energia elétrica, ou energia térmica em energia mecânica, sua eficiência global pode ser determinada pela equação 3.15. A eficiência global de uma máquina é sempre menor que 1, devido a diversas perdas de energia envolvidas, como perdas elétricas ou térmicas, além das perdas por atrito.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta etapa, são descritos os materiais e métodos utilizados na realização deste trabalho. Aborda-se sobre os materiais empregados na construção da turbina e o método utilizado para determinar a potência e eficiência da mesma.

4.1 Materiais

4.1.1 Turbina

Para aplicação do método foi necessário construir uma turbina. A turbina escolhida para teste foi do tipo multipás (rotor tipo Western) devido à baixa velocidade dos ventos na região em que foi ensaiada a turbina. Esta foi construída em aço SAE 1020 de baixo carbono, possuindo diâmetro externo de 2500mm e 18 pás inclinadas em um ângulo de 45° em relação ao plano transversal ao eixo. Segundo a bibliografia estuda a referida turbina apresenta uma eficiência entre 12 a 30%, *Tip Speed Ratio* (TSR) entre 0,2 a 2, conforme mostra o gráfico da Figura 16. Uma imagem da turbina pode ser vista na Figura 17.

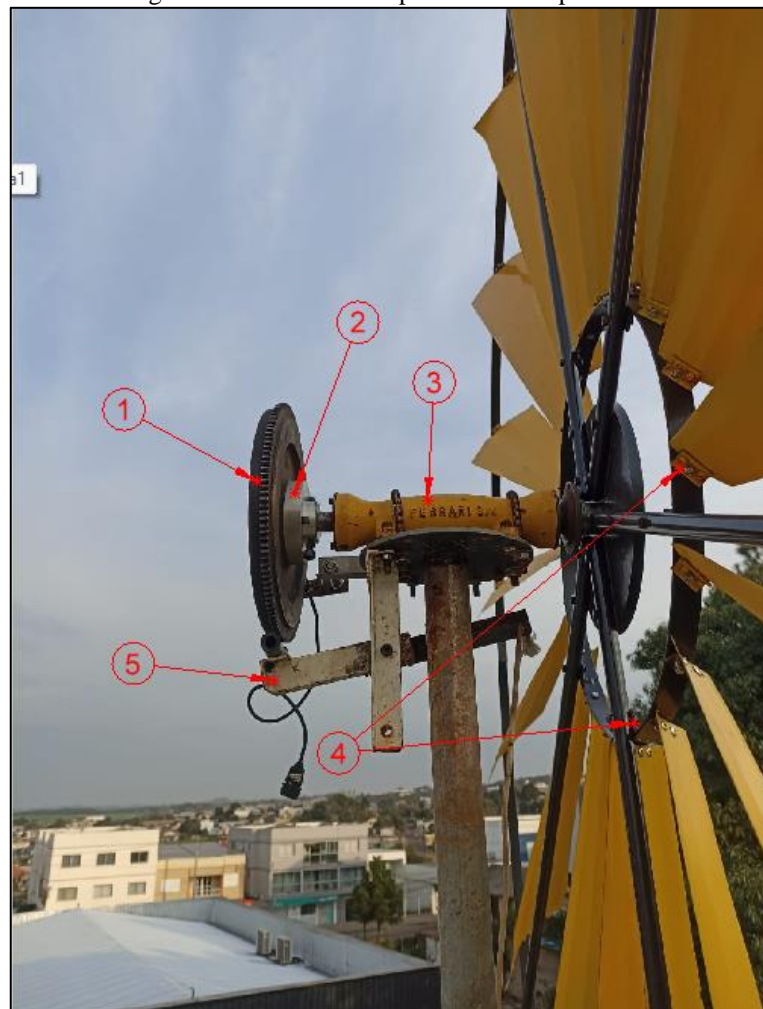
Figura 17 - Turbina multipás (18 pás)



Fonte: Autor (2024).

Para adicionar inércia no sistema e também possibilitar a leitura das velocidades instantâneas da turbina, foi fixado um volante automotivo dentado junto ao eixo da turbina. Este volante poderia ser substituído por outro tipo, mas como ele possui uma massa não desprezível, ele aumenta a inércia do sistema melhorando as condições de medição. As Figuras 18 e 19 apresentam os componentes empregados individualmente na construção da turbina e, em seguida, são identificados e descritos com mais detalhes.

Figura 18 - Turbina multipás e seus componentes



Fonte: Autor (2024).

Figura 19 - Turbina multipás e seus componentes



Fonte: Autor (2024).

- 1- Volante dentado: Usou-se um volante dentado em ferro fundido, com diâmetro externo de 281mm possuindo 132 dentes, acoplado ao eixo da turbina e é utilizado para realizar a leitura das velocidades angulares instantâneas da turbina pelo sensor indutivo e adicionar inércia ao sistema;
- 2- Flange: Barra redonda de 4" fabricada em aço SAE 1020 com comprimento de 45mm, responsável por fixar o volante dentado ao eixo da turbina, devido à diferença de diâmetros;
- 3- Conjunto mancal com eixo: Para essa finalidade foi utilizado um eixo com mancal para serra circular da marca Ferrari 3/4" com rolamentos de esferas;

- 4- Cantoneiras: Cantoneira 1/8" x 3/4" fabricada em aço SAE 1020, possuindo comprimento de 30mm, tem a função de fixar as pás e os tubos aos arcos da turbina. No total foram utilizadas 48 cantoneiras;
- 5- Sistema de frenagem: Conjunto de cantoneira 1/8" x 1" fabricada em aço SAE 1020 com tubo de borracha fixado na ponta da cantoneira móvel para possibilitar a frenagem da turbina;
- 6- Arco externo: Barra chata calandrada de 1/8" x 1" fabricada em aço SAE 1020 possuindo diâmetro externo de 2500mm, responsável por fixar a pá na extremidade externa;
- 7- Disco central: Fabricado em aço SAE 1020, possui diâmetro externo de 270mm e espessura de 3/16", é o elemento responsável pela fixação da turbina ao eixo e faz a sustentação de toda a estrutura da turbina;
- 8- Pás: Fabricadas em chapa de aço galvanizada com 1,5 mm de espessura. Possui dimensão conforme o detalhamento mostrado no Apêndice C. É responsável por transformar a energia cinética dos ventos, em trabalho mecânico. Na fabricação da turbina foi utilizado 18 pás;
- 9- Raio: Fabricado com tubo de aço SAE 1020, tendo diâmetro externo de 9,53 mm e comprimento de 1230mm, é responsável por fixar os arcos e dar sustentação a estrutura da turbina, foram utilizados na construção 6 tubos;
- 10- Arco interno: Barra chata calandrada 1/8" x 1" fabricada em aço SAE 1020 possuindo diâmetro externo de 500mm, responsável por fixar a pá na extremidade interna.

Os desenhos detalhados da construção da turbina podem ser vistos no Apêndice C.

4.1.2 Instrumentação para leitura e aquisição de dados

Para a medição da potência da turbina é necessário conhecer as velocidades instantâneas do vento e a velocidade angular da turbina. Para medir a velocidade do vento foi usado um anemômetro de conchas controlado por uma plataforma programável Arduino SV10 conectado a um sistema de aquisição e processamento de dados. A Figura 20, mostra o modelo de anemômetro utilizado.

Figura 20 - Anemômetro Arduino SV10



Fonte: Autor (2024).

Para obter os valores instantâneos de velocidade angular da turbina usou-se um sistema de aquisição e processamento de dados da marca Pro Tune modelo Connect Box – CB 1204 (Figura 21), composto por um sensor de rotação indutivo posicionado a 1mm do volante dentado, que faz a leitura da movimentação do volante a partir da passagem dos dentes (pulsos).

Figura 21 - Pro Tune Connect Box – CB 1204



Fonte: Adaptado Protune (2024).

Os dados lidos por esta unidade de instrumentação são armazenados no datalog, e após o teste esses dados coletados são passados para uma planilha eletrônica, onde é possível obter os valores instantâneos de tempo, velocidades e potências, e também traçar as curvas de

potência e eficiência da turbina. A Figura 22 mostra o sensor de rotação indutivo empregado na leitura de rotação da turbina.

Figura 22 - Chicote com conector e sensor de rotação



Fonte: MTE-THOMSON (2024).

4.2 Método

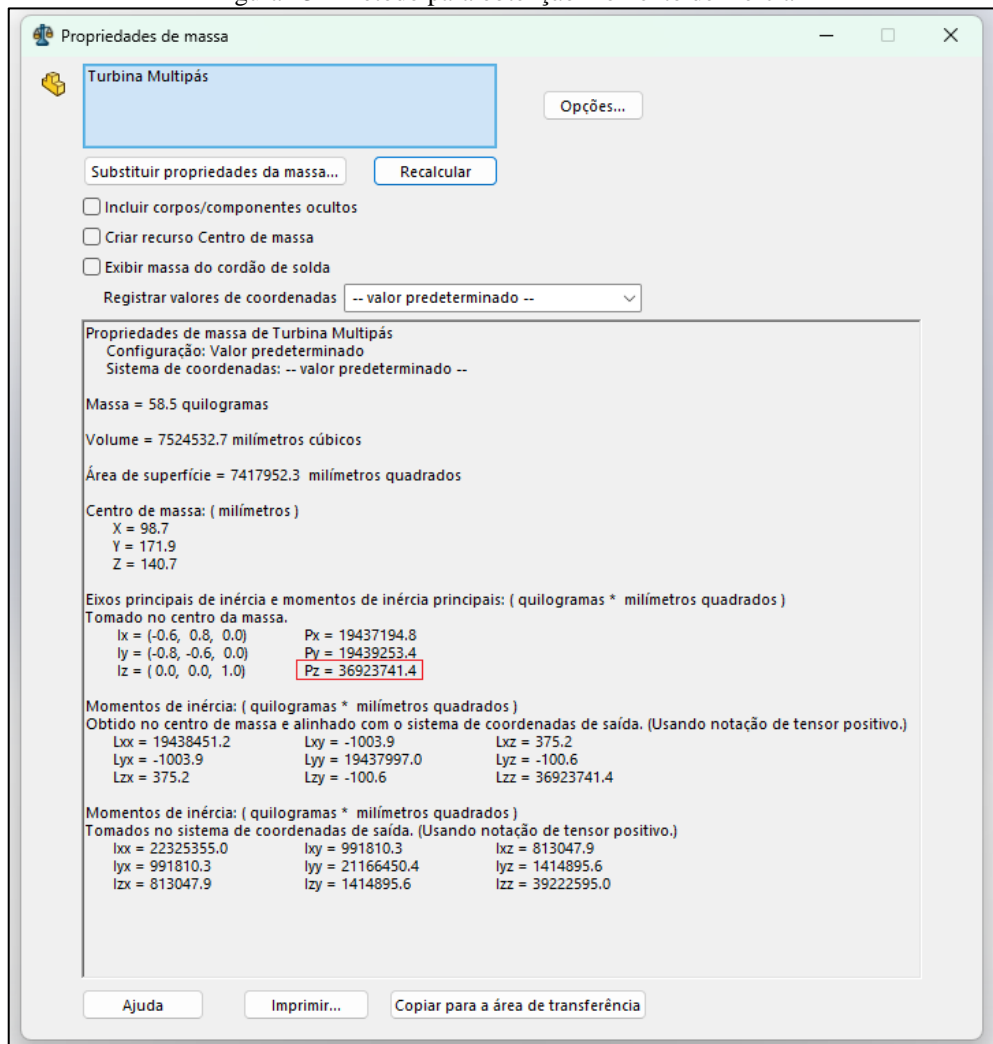
O presente trabalho trata da elaboração de um sistema para medir a potência e eficiência de turbinas eólicas de pequeno porte, independente do modelo utilizado. Assim, para atingir este fim deve-se seguir os princípios apresentados na revisão bibliográfica de forma clara e precisa.

O rendimento de qualquer equipamento que produz trabalho e potência é dado pela potência de saída dividido pela potência de entrada. No caso estudado é necessário saber a potência que o vento entrega para a turbina e a potência que a turbina consegue entregar na forma de rotação do seu eixo a cada instante.

Para conhecer a potência que o vento entrega é necessário conhecer a velocidade do vento no momento analisado, a área da turbina e também a densidade do ar no local. Com esses dados, usa-se a Equação 3.4 e obtém-se o valor da potência que o vento consegue entregar para a turbina. A velocidade do vento é obtida através da utilização do anemômetro SV10, já a densidade do ar, ou massa específica, que é influenciada pela altitude e temperatura do ar do local, obtém-se através da Equação 3.7 ou do gráfico ilustrado na Figura 10, que foi gerado em função da Equação 3.7. Com a massa específica do ar determinada, junto com velocidade do vento e a área da turbina, consegue-se calcular a potência do vento disponível, que será a potência de entrada.

A potência que a turbina entrega no seu eixo é obtida com base na velocidade angular da mesma. Para obter essa potência é necessário conhecer os valores das velocidades angulares da turbina a cada instante e conhecer o momento de inércia de massa do conjunto girante (turbina, volante e eixo). Para determinar o momento de inércia de massa do conjunto girante foi feito o modelamento do mesmo utilizando o software SolidWorks. A partir deste modelamento, o software consegue calcular o momento de inércia que fica disponível na aba propriedades de massa. O valor considerado será o valor obtido no software. Neste cálculo foram desprezados os movimentos dos elementos rolantes do rolamento. A Figura 23 abaixo, ilustra o método de análise para obter o momento de inércia.

Figura 23 - Método para obtenção momento de inércia



Fonte: Autor (2024).

Com os dados de funcionamento da turbina coletado pelo Connect Box – CB 1204 com o auxílio do sensor de rotação, obtém-se as velocidades angulares a cada instante e pode-se determinar através da Equação 3.12 a energia. De posse desses dados, usa-se a Equação 3.13 para determinar o ganho de energia da turbina em um determinado tempo. Com este valor definido, pode-se determinar a potência que a turbina entrega a seu eixo, utilizando-se a Equação 3.14. Usando-se esse sistema de análise, é possível determinar a potência que a turbina está absorvendo instantaneamente pela variação de sua energia, permitindo determinar o ganho de potência em um curto intervalo de tempo. É importante salientar que essa potência de saída encontrada deve ser menor que a potência disponível no vento.

Por fim, com os valores da potência de entrada e saída obtidos, pode-se determinar a eficiência da turbina usando-se a Equação 3.15. Espera-se que o rendimento desta turbina esteja na faixa de 12 a 30% de acordo com a bibliografia estudada e mostrada na Figura 16.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem por objetivo apresentar os cálculos realizados para determinar a potência e o rendimento da turbina a partir dos dados coletados. Em virtude do grande número de dados coletados sofrerem variações com o decorrer do tempo, pois estes são medidos a cada 0,1s, como é o caso da rotação da turbina e da velocidade do vento, foi desenvolvida uma planilha eletrônica no Excel para auxiliar na compactação dessas informações e na elaboração dos resultados. Os resultados são mostrados na forma de planilhas e gráficos no Apêndice A.

5.1 Dados para obtenção dos resultados

5.1.1 Área da turbina

Para se obter área da turbina usa-se a equação a seguir:

$$A_T = \pi \cdot R^2 \quad (3.1)$$

Onde:

A_T = área da turbina [m²];

R = raio do rotor da turbina [m].

Considerando que o diâmetro externo da turbina é de 2500mm e que o raio é a metade do diâmetro, temos:

$$A_T = \pi \cdot 1,25^2 = 4,91 \text{ [m}^2\text{]}$$

5.1.2 Massa específica do ar

Para obter a densidade do ar, ou massa específica, precisa-se antes conhecer a temperatura do ar no local e a altitude da região onde a turbina está instalada, devido a estes dois fatores influenciarem diretamente na massa específica do ar. Para este estudo adotou-se o valor da temperatura ambiente (20°C) para todos os testes e uma de altitude de 783m em relação

ao nível do mar (Erechim, RS). De posse desses valores e através da Equação 3.7 obtém-se a densidade do ar no local:

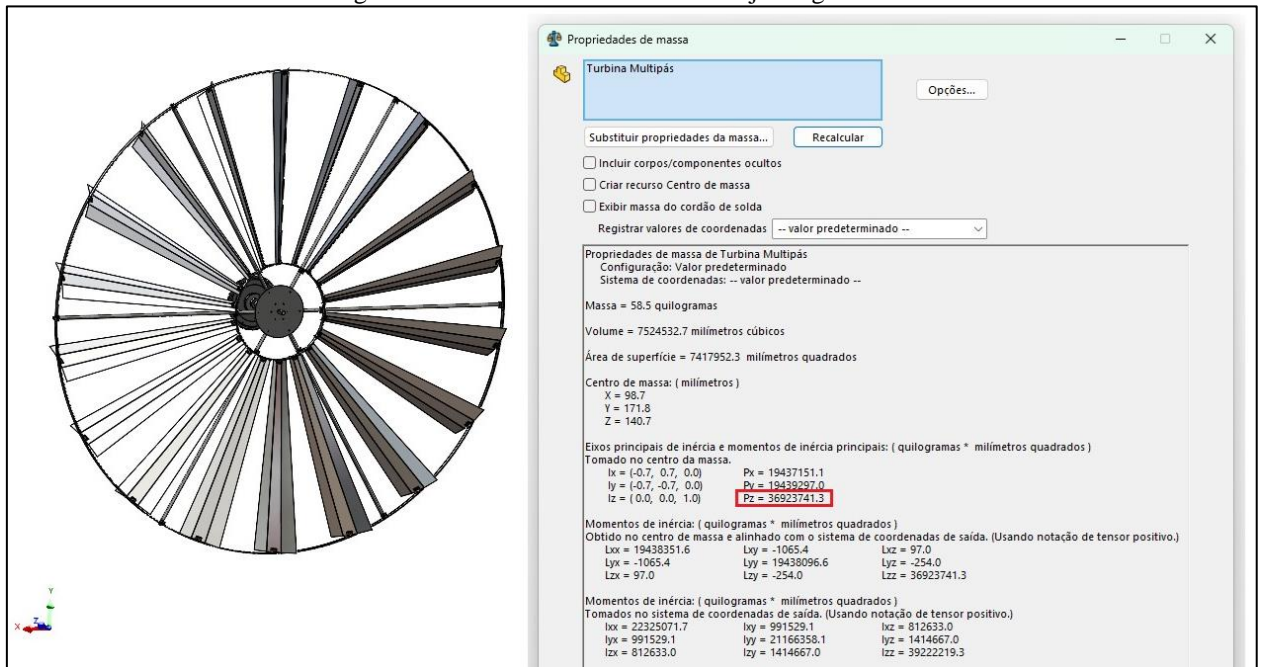
$$\rho \cong \frac{353,4 \cdot \left(1 - \frac{783}{45271}\right)^{5,2624}}{273,15 + 20} = 1,10 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Este valor é fixo para todos os cálculos de potência disponível do vento apresentados na planilha eletrônica.

5.1.3 Momento de inércia de massa do conjunto girante

Conforme mencionado anteriormente, o momento de inércia do conjunto girante (turbina, volante e eixo) foi obtido através do software SolidWokrs, como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 - Momento de inércia do conjunto girante



Fonte: Autor (2024).

O valor de inércia fornecido pelo SolidWokrs é dado em Kg.mm², portando, é necessário realizar uma conversão para o sistema internacional, que é Kg.m². Assim, o valor do momento de inércia usado nos cálculos é de 36,92 Kg.m².

5.1.4 Velocidades angulares instantâneas da turbina e do vento

Para obtenção destes valores soltou-se o freio da turbina e realizou-se medições das velocidades angulares da turbina a cada 0,1 segundos por meio de um sensor indutivo que detectou a passagem dos dentes do volante. O tempo de aquisição de dados de cada teste foi de aproximadamente 15 segundos após o qual freava novamente a turbina. Foi feita esta ação diversas vezes, para obter o ganho de velocidade angular neste intervalo de tempo. Os valores considerados foram somente quando houve aumento de rotação. No momento em que a rotação começou a decrescer, descartou-se os dados. Paralelamente havia um anemômetro registrando a velocidade do vento no exato momento em que registrava a velocidade angular da turbina, ou seja, a cada 0,1 segundos. Para estes testes, a turbina foi direcionada manualmente para a direção do vento.

De posse da velocidade angular calcula-se a velocidade periférica (velocidade tangencial) na ponta da pá da turbina pela equação a seguir:

$$V_p = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad (3.1)$$

Onde:

V_p = Velocidade periférica [m/s];

D: diâmetro do rotor da turbina [m];

n: rotação do conjunto girante [rpm].

Conhecendo os valores da velocidade do vento e da velocidade periférica da turbina, pode-se obter a razão de velocidades (*Tip Speed Ratio*) aplicando a Equação 3.10. Estes cálculos são mostrados na planilha eletrônica devido variarem com o tempo.

5.1.5 Potência fornecida pelo vento

A potência disponível no vento foi calculada conforme a Equação 3.4. Esta potência varia conforme varia a velocidade do vento. Devido a essa variação, ao longo do tempo, a potência também foi calculada em uma planilha eletrônica, conforme mostrado no Apêndice A.

5.1.6 Potência extraída do vento pela turbina

Para obter essa potência, é necessário determinar o ganho de energia em um determinado período de tempo. Para isso, utiliza-se a Equação 3.12 para calcular a energia a cada instante. Com os valores de energia calculados para cada intervalo de tempo, é possível obter a variação de energia através da Equação 3.13. De posse desses valores, a potência extraída pela turbina pode ser determinada utilizando a Equação 3.14. Esses cálculos são apresentados no Anexo A.

5.1.7 Rendimento da turbina

Conforme mencionado anteriormente, o rendimento de qualquer equipamento que produz trabalho é obtido através da relação da potência de saída pela potência de entrada. Neste estudo, a potência de entrada é a potência disponível no vento e a potência de saída é a potência extraída pela turbina. Para calcular este valor, basta dividir a segunda pela primeira, conforme a Equação 3.15. Estes resultados também são mostrados na planilha do Apêndice A.

5.2 Resultados

Os resultados apresentaram grande variação devido à intensa turbulência no local de instalação da turbina, que está situada próxima de prédios e árvores, fatores que contribuem para essa inconsistência do vento. A Figura 25 mostra o local de instalação da turbina.

Figura 25 - Local de instalação da turbina



Fonte: Autor (2024).

Conforme mostrado na Figura 16, o rendimento desse modelo de turbina situa-se entre 12% e 30%, com o *Tip Speed Ratio* (TSR) variando de 0 a 2. Como evidenciado nos cálculos e gráficos do Apêndice A, observou-se que o rendimento permaneceu dentro dessa faixa apenas em dois casos analisados, em coerência com a razão de velocidades, estando de acordo com a bibliografia estudada. No entanto, os resultados exibem variações significativas, com picos de rendimento muito elevados ou baixos, demonstrando inconstância em certos pontos. Isso pode ser atribuído à grande turbulência gerada no local da instalação da turbina, que provoca variações acentuadas na velocidade e na direção do vento, levando a leituras incorretas e impactando significativamente os resultados.

Com intuito de melhorar a visualização dos resultados, foi calculada a média dos dados coletados nos Teste 1 e Teste 6, agora considerando um intervalo de tempo de 0,3 segundos.

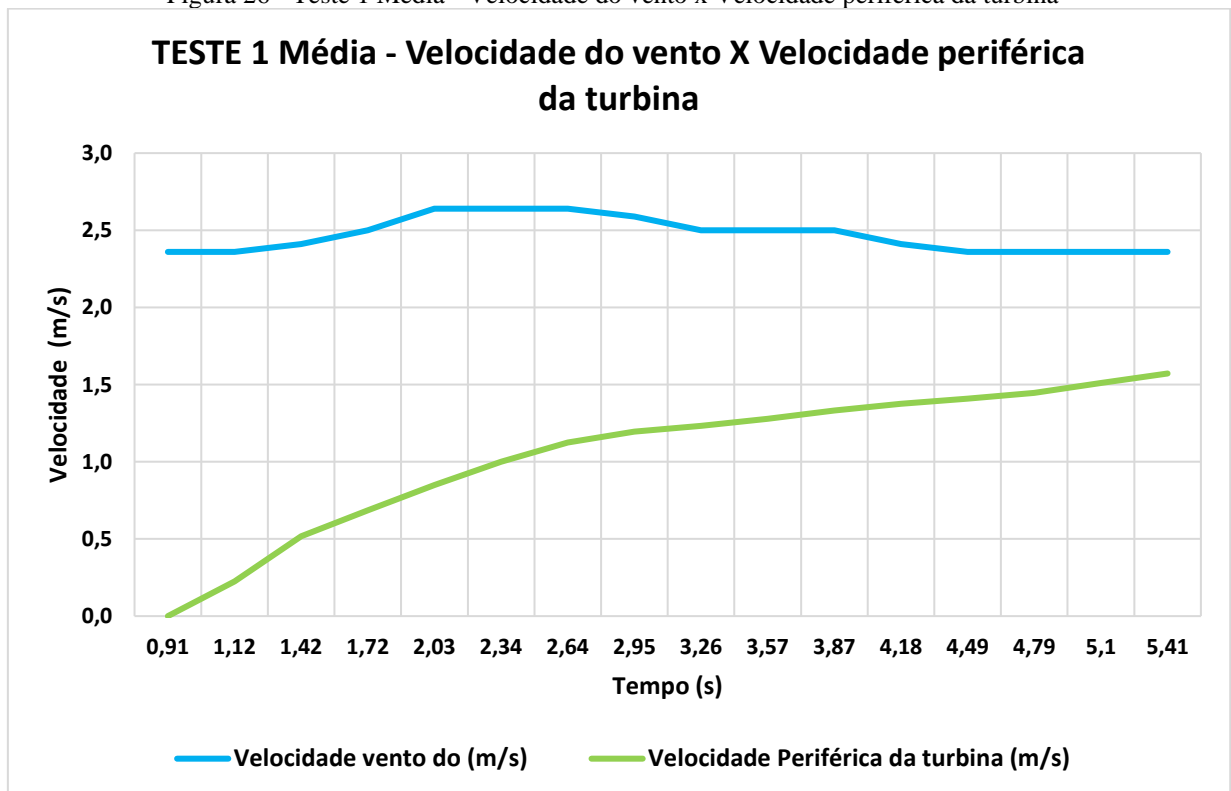
Esses testes foram os melhores obtidos devido apresentarem menores variações. Os resultados podem ser vistos abaixo:

Tabela 1 - Resultados teste 1 com a média de intervalos de tempo

Tempo (s)	Rotação (Rpm)	Velocidade vento do (m/s)	Velocidade Periférica da turbina (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR)	Potência disponível no vento (W)	Velocidade Angular (Rad/s)	Energia (J)	Varição de energia (J)	Varição do tempo (s)	Potência extraída pela turbina (W)	Rendimento da turbina	Porcentagem (%)
0,91	0	2,36	0,00	0,00	35,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,12	1,72	2,36	0,23	0,10	35,48	0,18	0,60	2,56	0,30	8,53	0,24	24,05
1,42	3,95	2,41	0,52	0,21	37,78	0,41	3,16	2,38	0,30	7,93	0,21	20,99
1,72	5,23	2,5	0,68	0,27	42,18	0,55	5,54	2,99	0,31	9,64	0,23	22,87
2,03	6,49	2,64	0,85	0,32	49,67	0,68	8,53	3,29	0,31	10,61	0,21	21,37
2,34	7,64	2,64	1,00	0,38	49,67	0,80	11,82	3,12	0,30	10,41	0,21	20,95
2,64	8,59	2,64	1,12	0,43	49,67	0,90	14,94	1,94	0,31	6,25	0,13	12,58
2,95	9,13	2,59	1,20	0,46	46,90	0,96	16,88	1,05	0,31	3,39	0,07	7,23
3,26	9,41	2,5	1,23	0,49	42,18	0,99	17,93	1,36	0,31	4,38	0,10	10,39
3,57	9,76	2,5	1,28	0,51	42,18	1,02	19,29	1,70	0,30	5,65	0,13	13,40
3,87	10,18	2,5	1,33	0,53	42,18	1,07	20,98	1,38	0,31	4,46	0,11	10,57
4,18	10,51	2,41	1,38	0,57	37,78	1,10	22,36	1,12	0,31	3,61	0,10	9,56
4,49	10,77	2,36	1,41	0,60	35,48	1,13	23,48	1,24	0,30	4,12	0,12	11,62
4,79	11,05	2,36	1,45	0,61	35,48	1,16	24,72	2,24	0,31	7,23	0,20	20,38
5,1	11,54	2,36	1,51	0,64	35,48	1,21	26,96	2,24	0,31	7,23	0,20	20,37
5,41	12,01	2,36	1,57	0,67	35,48	1,26	29,20					

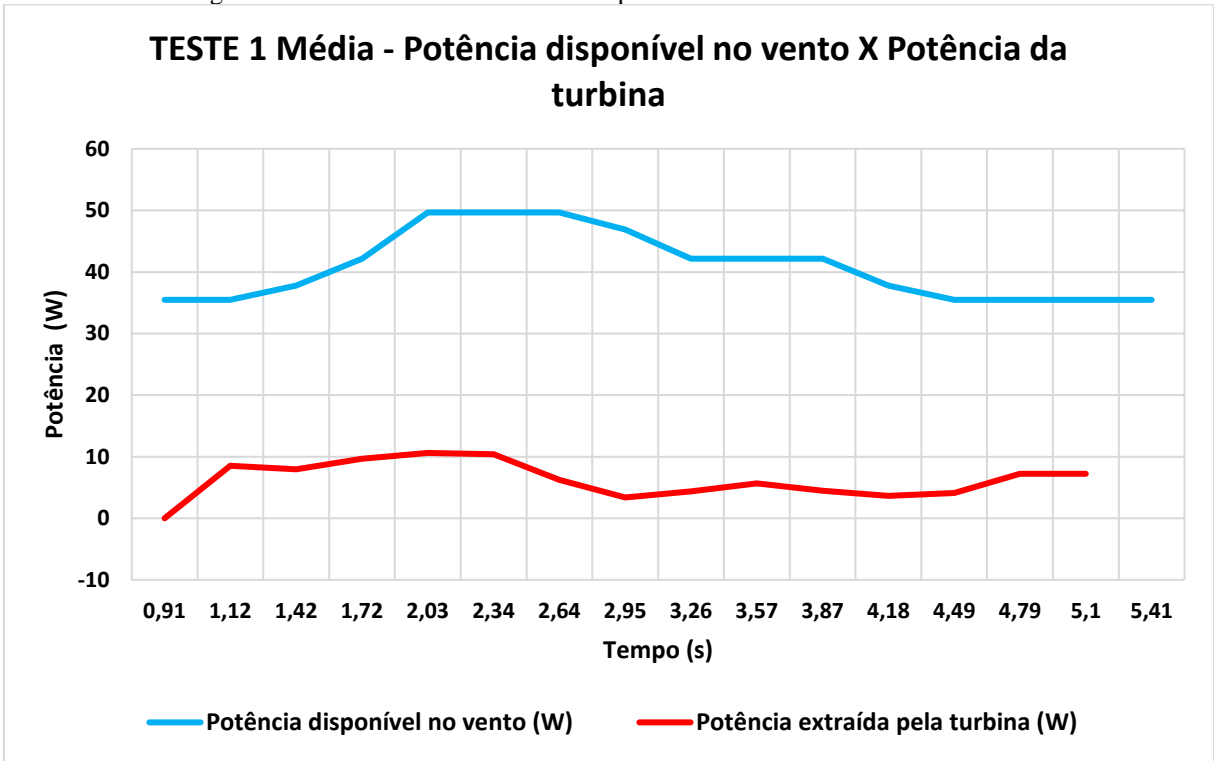
Fonte: Autor (2024).

Figura 26 - Teste 1 Média - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina



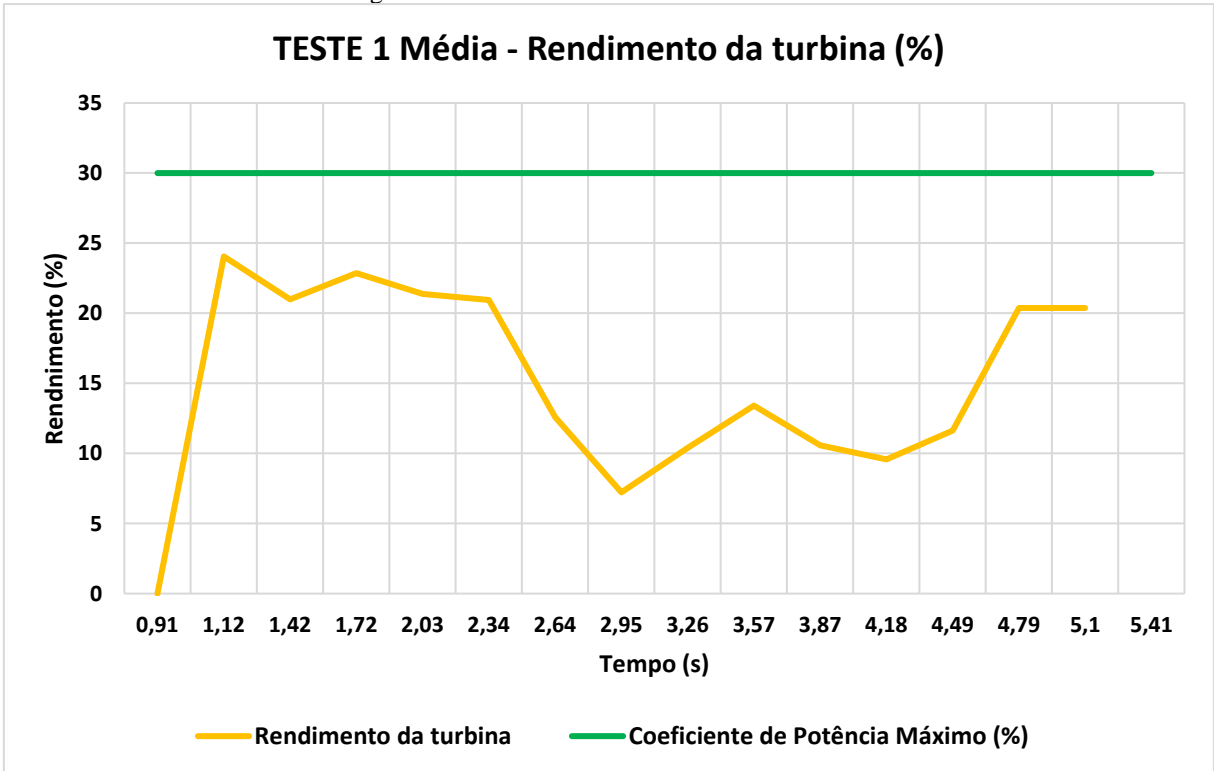
Fonte: Autor (2024).

Figura 27 - Teste 1 Média - Potência disponível no vento x Potência da turbina



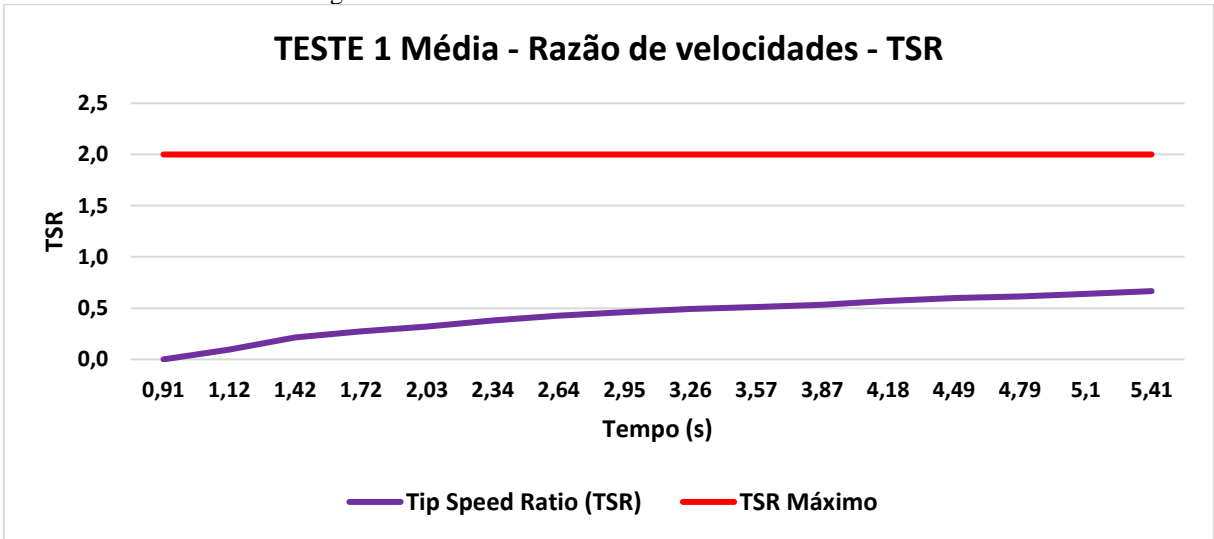
Fonte: Autor (2024).

Figura 28 - Teste 1 Média - Eficiência da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 29 - Teste 1 Média - Razão de velocidades - TSR



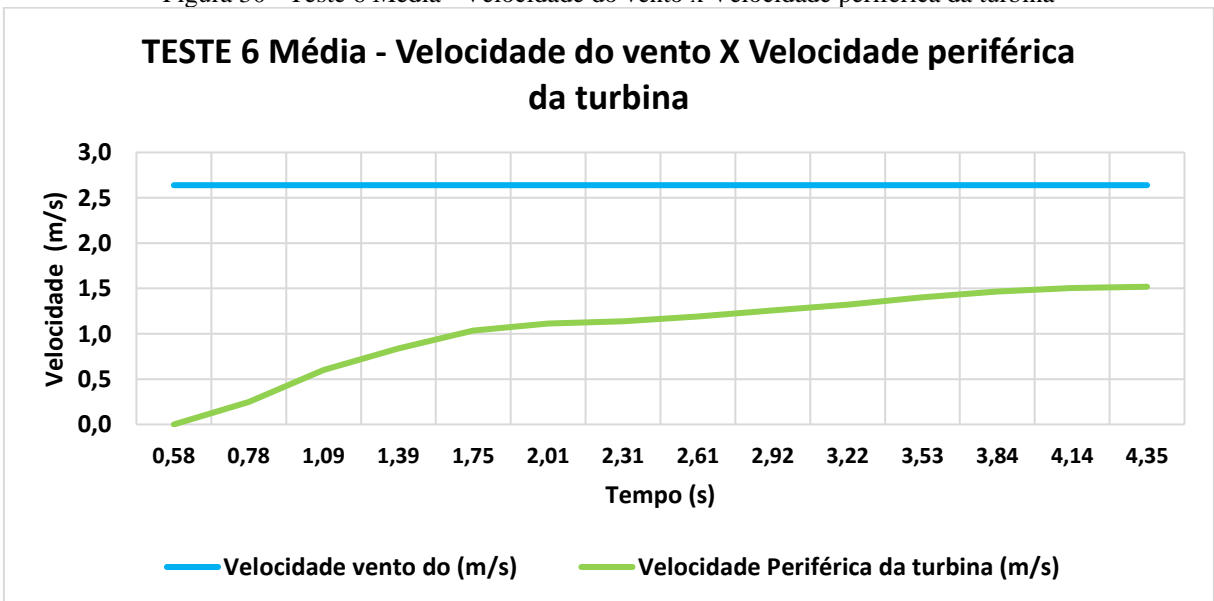
Fonte: Autor (2024).

Tabela 2 - Resultados teste 6 com a média de intervalos de tempo

Tempo (s)	Rotação (Rpm)	Velocidade vento do (m/s)	Velocidade Periférica da turbina (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR) da Turbina	Potência disponível no vento (W)	Velocidade Angular (Rad/s)	Energia (J)	Variação de energia (J)	Variação do tempo (s)	Potência extraída pela turbina (W)	Rendimento da turbina	Porcentagem (%)
0,58	0	2,64	0,00	0,00	49,60	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00
0,78	1,9	2,64	0,25	0,09	49,60	0,20	0,73	3,55	0,31	11,46	0,23	23,11
1,09	4,6	2,64	0,60	0,23	49,60	0,48	4,28	4,01	0,30	13,36	0,27	26,94
1,39	6,4	2,64	0,84	0,32	49,60	0,67	8,29	4,34	0,36	12,06	0,24	24,32
1,75	7,9	2,64	1,03	0,39	49,60	0,83	12,64	1,99	0,26	7,66	0,15	15,45
2,01	8,5	2,64	1,11	0,42	49,60	0,89	14,63	0,70	0,30	2,32	0,05	4,68
2,31	8,7	2,64	1,14	0,43	49,60	0,91	15,32	1,44	0,30	4,80	0,10	9,69
2,61	9,1	2,64	1,19	0,45	49,60	0,95	16,77	1,89	0,31	6,11	0,12	12,31
2,92	9,6	2,64	1,26	0,48	49,60	1,01	18,66	1,99	0,30	6,65	0,13	13,40
3,22	10,1	2,64	1,32	0,50	49,60	1,06	20,65	2,53	0,31	8,15	0,16	16,43
3,53	10,7	2,64	1,40	0,53	49,60	1,12	23,18	2,22	0,31	7,15	0,14	14,42
3,84	11,2	2,64	1,47	0,56	49,60	1,17	25,40	1,38	0,30	4,60	0,09	9,27
4,14	11,5	2,64	1,51	0,57	49,60	1,20	26,77	0,47	0,21	2,23	0,04	4,49
4,35	11,6	2,64	1,52	0,58	49,60	1,21	27,24					

Fonte: Autor (2024).

Figura 30 - Teste 6 Média - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 31 - Teste 6 Média - Potência disponível no vento x Potência da turbina

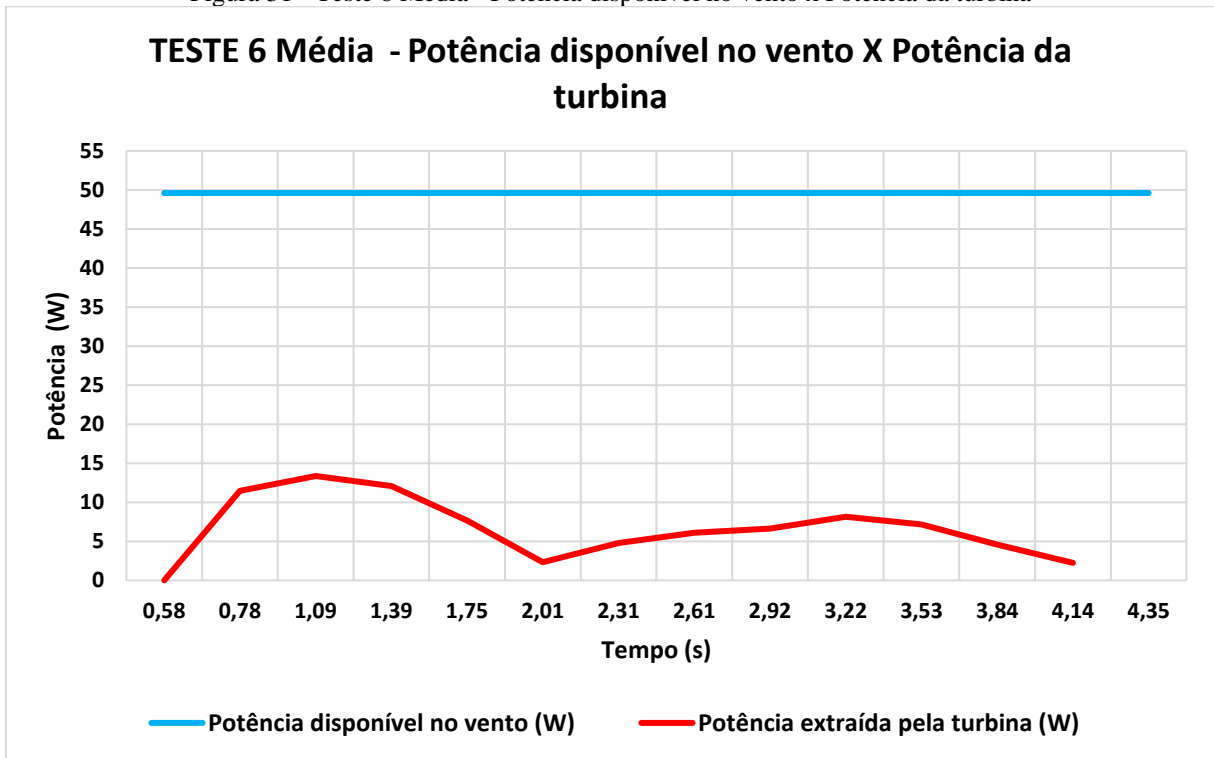


Figura 32 - Teste 6 Média - Eficiência da turbina

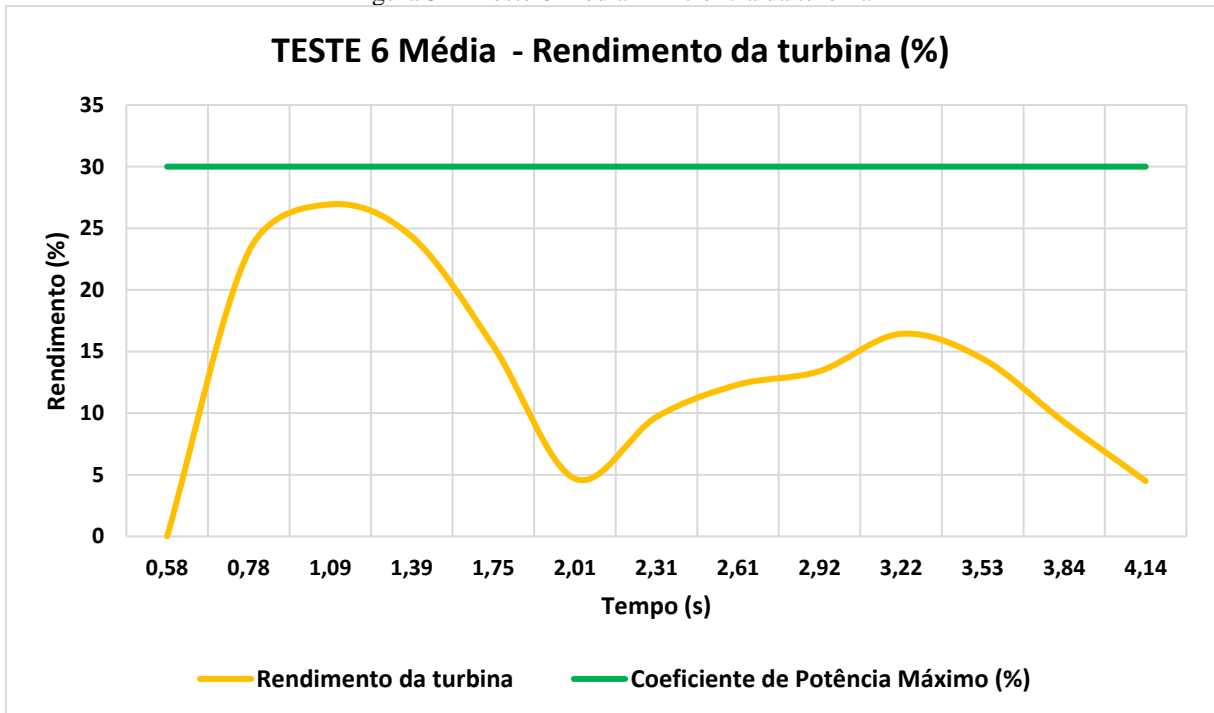
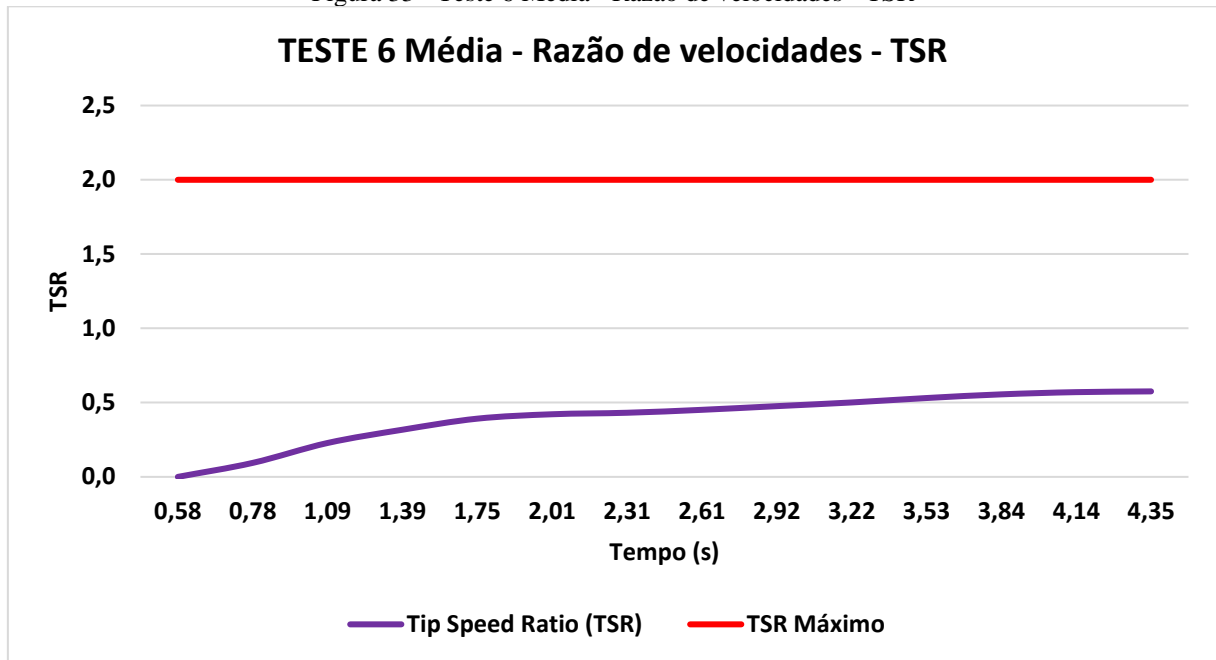


Figura 33 - Teste 6 Média - Razão de velocidades - TSR



Fonte: Autor (2024).

Ao analisar os gráficos, observamos que, ao considerar um intervalo de tempo maior, os resultados já demonstram uma melhoria, reduzindo os picos. Conforme mencionado anteriormente, o rendimento dessa turbina varia entre 12% e 30%, com um *Tip Speed Ratio* (TSR) de 0 a 2. Ao analisar os Testes 1 e 6, percebe-se que os resultados estão de acordo com a literatura estudada. O Teste 1 apresentou um rendimento médio de 16% com um TSR médio de 0,45, enquanto o Teste 6 mostrou um rendimento médio de 14,6% e um TSR médio de 0,43 ambos condizentes com os valores estudados, comprovando a eficácia do sistema aplicado.

6 CONCLUSÕES

O sistema estudado para medir a potência e a eficiência de turbinas de pequeno porte conseguiu cumprir com os objetivos propostos, visto que é uma alternativa viável para medição de potência e eficiência de turbinas eólicas de pequeno porte, porém é sensível a ventos turbulentos. No entanto, destaca-se que o local escolhido para os testes não foi adequado devido à intensa turbulência e a falta de ventos constantes, o que dificultou a realização das medições.

Esse sistema não é adequado para condições de ventos muito perturbados, devido as variações acentuadas na velocidade e na direção do vento impactarem nas leituras do sistema, gerando dados incorretos e comprometendo significativamente os resultados. É indicado para ventos com direção constante, como em túnel de vento, porém para turbinas de eixo vertical o sistema estudado pode ser utilizado mesmo com variação da direção do vento.

Os rendimentos dos testes 1 e 6 estão em conformidade com a bibliografia estudada, mostrando uma eficiência na faixa de 12 a 30%. Porém alguns testes apresentaram alguns picos de eficiência superior e inferior a essa faixa. Acredita-se que isto se deve à variação na velocidade e na direção do vento no local o que induziu a leituras incorretas por parte do sistema acarretando nesses picos.

Os testes que apresentam rendimento bem abaixo do esperado também podem ser atribuídos à grande variação na direção do vento. Nesses casos, a velocidade medida pelo anemômetro é significativamente maior do que a que efetivamente chega à turbina, uma vez que o vento atinge a turbina em um ângulo desfavorável, dificultando um bom aproveitamento. Houve casos em que o rendimento ficou acima do esperado, o que também pode ser atribuído à brusca variação na direção do vento. Nesse caso, a velocidade medida pelo anemômetro era significativamente inferior à velocidade do vento que realmente atingiu a turbina.

Diante disso, acredita-se que a grande variação na velocidade e na direção do vento pode levar a leituras incorretas, afetando significativamente os resultados. Salienta-se que o posicionamento manual da turbina de acordo com a direção do vento pode resultar em erros quando há uma grande variação na direção do vento, pois a velocidade do vento que atinge a turbina pode não corresponde com a mesma medida pelo anemômetro. O anemômetro utilizado, de eixo vertical (anemômetro de conchas), não é afetado pela variação da direção do vento, enquanto a turbina em estudo é influenciada por essas mudanças. Como o anemômetro está posicionado a uma certa distância da turbina e em uma área de grande turbulência, é possível

que a velocidade registrada por ele não seja a mesma que chega à turbina, influenciando os cálculos e resultando em valores de eficiência mais altos ou mais baixos do que o esperado.

Portanto, embora o método apresentado tenha se mostrado eficaz, seria recomendável repetir o experimento em um local com ventos mais constantes e não perturbados, a fim de verificar a oscilação dos resultados.

7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Afim de dar continuidade e melhorar este trabalho, propõem-se as seguintes sugestões para propostas futuras:

- Fazer uma nova análise em um outro local de instalação;
- Construir novos modelos de turbinas e testa-las;
- Analisar o rendimento com o uso de um gerador elétrico;
- Verificar o momento de inércia do sistema experimentalmente;
- Considerar a aceleração angular ao invés da variação da energia cinética.

REFERÊNCIAS

- AMARANTE, O. A. et al. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 12/05/2024.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2ª. ed. Brasília. Agencia Nacional de Energia Elétrica, 2005.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª. ed. Brasília. Agencia Nacional de Energia Elétrica, 2008.
- ARAÚJO, Bruno Plattek de; WILLCOX, Luiz Daniel. **Reflexões críticas sobre a experiência brasileira de política industrial no setor eólico**. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15360/1/BS47__Eolica_FECHADO.pdf. Acesso em: 05/03/2024
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EOLICA. **Energia Eólica: O Setor**. [s.l], [2023]. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/o-setor/>. Acesso em: 02/03/2024.
- BEER, F. P; JOHNSTON, E. R; CORNWELL, P. J; SELF, B. P; SANGHI, S. **Mecânica vetorial para engenheiros: dinâmica**. 11ª edição. Porto Alegre: Editora AMGH, 2019.
- CLEMENTE, Geovane Costa; JUNIOR, Luiz Justino da Silva. **Cálculo da eficiência energética de turbina eólica de eixo horizontal em túnel de vento com aerogerador**. Disponível em: <<https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/15153/209209213709>>. Acesso em: 20/08/2024
- CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. **Energia Eólica: Para produção de energia elétrica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2013.
- DUTRA, Ricardo (Org.). **Energia Eólica: Princípios e Tecnologia**. [s.l]: Cresesb, 2008.
- FADIGAS, Eliane A. Faria Amaral, **Energia Eólica**. Barueri: Editora Manole Ltda, 2011.
- GWEC. **Global Wind Report 2022**. Disponível em: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/03/GWEC-GLOBAL-WIND-REPORT-2022.pdf>. Acesso em: 03/03/2024.
- HALLIDAY, David; RESNICK Robert; WALKER Jearl. **Fundamentos de Física. Volume 1 - Mecânica**. 12ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2023.
- HAU, Erich, **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. 3 Ed. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- 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.
- LOPES, Alberto dos Santos. **Projeto e testes de um aerogerador de pequeno porte e de um sistema de medição de eficiência mecânica**. 2011. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- MARQUES, Jeferson. **Turbinas eólicas: Modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8442/JEFERSON%20MARQUES.pdf>>. Acesso em: 07/03/2024.
- MOREIRA, José Roberto Simões (Org.). **Energia Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. Rio de Janeiro: Ltc-livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2017.

MTE-THOMSON. **Sensor de rotação.** Disponível em: <<https://cate.mte-thomson.com.br/pt/mx/produto/detalhes/7032/sensor-de-rotacao>>. Acesso em: 15/05/2014.

MÜLLER, Matheus do Nascimento. **Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal.** 2015. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada.** 4. Ed. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda, 2011

NUNES, Gillian de Azevedo; MANHÃES, Alex Azeredo. **Energia eólica no Brasil: uma alternativa inteligente frente às demandas elétricas atuais.** Bolsista de Valor: Revista de Divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense, Rio de Janeiro, v. 1, n. 5, p.163-167, out. 2010.

PINTO, Jaime Soares; PASA, Michael Everton. **Projeto aerodinâmico de pás de aerogerador de eixo horizontal para instalação em uma propriedade rural.** 2013. 59f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina, Horizontina, 2013.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de Energia Eólica.** Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2012.

PORTAL ENERGIA. **Como funciona um aerogerador.** Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/funcionamento-de-um-aerogerador/>>. Acesso em: 03/03/2024.

PROTUNE. **Connect Box – CB 1204.** Disponível em: <<https://www.protune.com.br/produto/cb-1204>>. Acesso em: 15/05/2024.

RAGHEB, © M. **WIND GENERATORS HISTORY.**2019 Disponível em: <<https://mragheb.com/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Wind%20Generators%20History.pdf>>. Acesso em: 10/05/2024.

WENZEL, Guilherme München. **Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal.** 2007. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

APÊNDICE

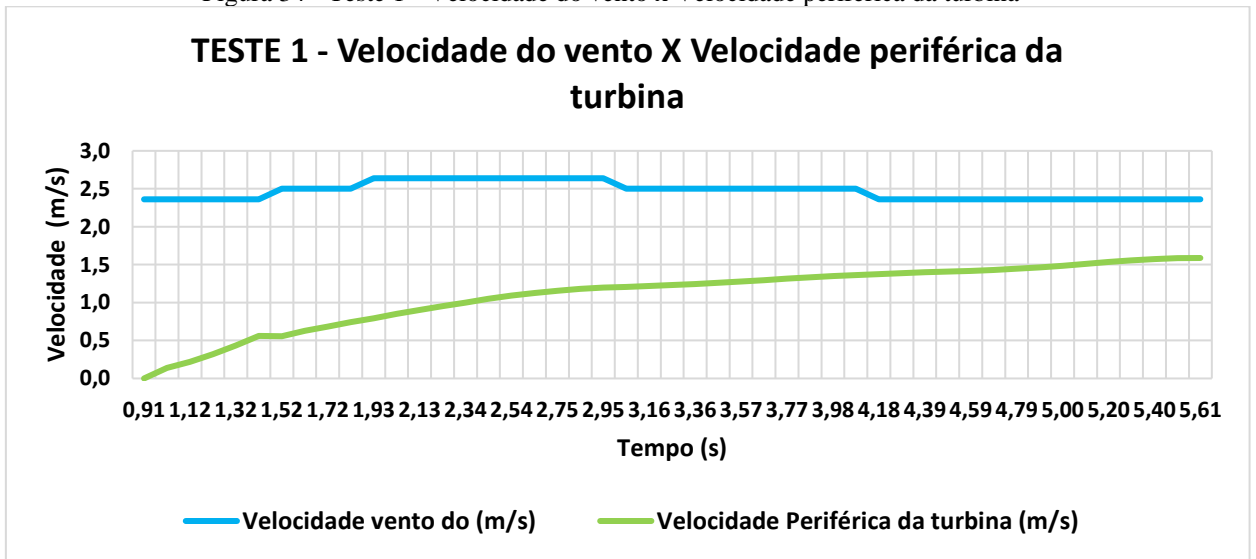
Apêndice A – Cálculos e gráficos

Tabela 3 - Resultados teste 1

Tempo (s)	Rotação (Rpm)	Velocidade vento do (m/s)	Velocidade Periférica da turbina (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR)	Potência disponível no vento (W)	Velocidade Angular (Rad/s)	Energia (J)	Varição de energia (J)	Varição do tempo (s)	Potência extraída pela turbina (W)	Rendimento da turbina	Porcentagem (%)
0,91	0,00	2,36	0,00	0,00	35,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,01	1,05	2,36	0,14	0,06	35,53	0,11	0,22	0,34	0,10	3,35	0,09	9,42
1,12	1,67	2,36	0,22	0,09	35,53	0,17	0,56	0,65	0,10	6,31	0,18	17,76
1,22	2,45	2,36	0,32	0,14	35,53	0,26	1,21	1,02	0,10	10,07	0,28	28,34
1,32	3,32	2,36	0,43	0,18	35,53	0,35	2,23	1,47	0,10	14,52	0,41	40,88
1,42	4,27	2,36	0,56	0,24	35,53	0,45	3,70	-0,04	0,10	-0,39	-0,01	-1,09
1,52	4,25	2,50	0,56	0,22	42,18	0,45	3,66	1,00	0,10	9,89	0,23	23,45
1,62	4,80	2,50	0,63	0,25	42,18	0,50	4,66	0,86	0,10	8,43	0,20	20,00
1,72	5,22	2,50	0,68	0,27	42,18	0,55	5,52	0,99	0,10	9,66	0,23	22,90
1,83	5,67	2,50	0,74	0,30	42,18	0,59	6,50	0,95	0,10	9,35	0,22	22,17
1,93	6,07	2,64	0,79	0,30	49,60	0,64	7,46	1,12	0,10	10,97	0,22	22,11
2,03	6,51	2,64	0,85	0,32	49,60	0,68	8,57	1,05	0,10	10,18	0,21	20,52
2,13	6,89	2,64	0,90	0,34	49,60	0,72	9,62	1,09	0,10	10,65	0,21	21,47
2,24	7,27	2,64	0,95	0,36	49,60	0,76	10,71	1,07	0,10	10,43	0,21	21,03
2,34	7,63	2,64	1,00	0,38	49,60	0,80	11,78	1,20	0,10	11,87	0,24	23,94
2,44	8,01	2,64	1,05	0,40	49,60	0,84	12,98	1,08	0,10	10,46	0,21	21,09
2,54	8,33	2,64	1,09	0,41	49,60	0,87	14,06	0,91	0,10	8,82	0,18	17,79
2,64	8,60	2,64	1,13	0,43	49,60	0,90	14,97	0,86	0,10	8,39	0,17	16,92
2,75	8,84	2,64	1,16	0,44	49,60	0,93	15,82	0,63	0,10	6,18	0,12	12,45
2,85	9,02	2,64	1,18	0,45	49,60	0,94	16,45	0,45	0,10	4,28	0,09	8,63
2,95	9,14	2,64	1,20	0,45	49,60	0,96	16,90	0,34	0,10	3,28	0,07	6,62
3,06	9,23	2,50	1,21	0,48	42,18	0,97	17,24	0,31	0,10	3,10	0,07	7,34
3,16	9,31	2,50	1,22	0,49	42,18	0,98	17,55	0,34	0,10	3,38	0,08	8,01
3,26	9,40	2,50	1,23	0,49	42,18	0,98	17,89	0,41	0,10	3,98	0,09	9,44
3,36	9,51	2,50	1,24	0,50	42,18	1,00	18,30	0,44	0,10	4,27	0,10	10,13
3,46	9,62	2,50	1,26	0,50	42,18	1,01	18,74	0,54	0,10	5,25	0,12	12,44
3,57	9,76	2,50	1,28	0,51	42,18	1,02	19,28	0,57	0,11	5,46	0,13	12,94
3,67	9,90	2,50	1,30	0,52	42,18	1,04	19,85	0,58	0,10	5,70	0,14	13,51
3,77	10,05	2,50	1,31	0,53	42,18	1,05	20,43	0,56	0,10	5,47	0,13	12,98
3,88	10,18	2,50	1,33	0,53	42,18	1,07	20,99	0,53	0,10	5,29	0,13	12,54
3,98	10,31	2,50	1,35	0,54	42,18	1,08	21,52	0,45	0,10	4,36	0,10	10,35
4,08	10,42	2,50	1,36	0,55	42,18	1,09	21,97	0,42	0,10	4,13	0,10	9,80
4,18	10,52	2,36	1,38	0,58	35,53	1,10	22,39	0,39	0,10	3,74	0,11	10,52
4,28	10,61	2,36	1,39	0,59	35,53	1,11	22,77	0,36	0,10	3,49	0,10	9,82
4,39	10,69	2,36	1,40	0,59	35,53	1,12	23,13	0,33	0,10	3,23	0,09	9,08
4,49	10,77	2,36	1,41	0,60	35,53	1,13	23,46	0,33	0,10	3,28	0,09	9,23
4,59	10,84	2,36	1,42	0,60	35,53	1,14	23,79	0,37	0,10	3,64	0,10	10,23
4,69	10,92	2,36	1,43	0,61	35,53	1,14	24,16	0,54	0,10	5,29	0,15	14,88
4,79	11,05	2,36	1,45	0,61	35,53	1,16	24,70	0,58	0,10	5,62	0,16	15,83
4,89	11,17	2,36	1,46	0,62	35,53	1,17	25,28	0,79	0,10	7,87	0,22	22,14
5,00	11,35	2,36	1,49	0,63	35,53	1,19	26,07	0,91	0,10	8,86	0,25	24,95
5,10	11,55	2,36	1,51	0,64	35,53	1,21	26,99	0,86	0,10	8,32	0,23	23,41
5,20	11,73	2,36	1,54	0,65	35,53	1,23	27,84	0,80	0,10	7,89	0,22	22,21
5,30	11,89	2,36	1,56	0,66	35,53	1,25	28,64	0,66	0,10	6,48	0,18	18,23
5,40	12,03	2,36	1,57	0,67	35,53	1,26	29,30	0,37	0,10	3,59	0,10	10,12
5,51	12,11	2,36	1,58	0,67	35,53	1,27	29,67	0,11	0,10	1,09	0,03	3,08
5,61	12,13	2,36	1,59	0,67	35,53	1,27	29,78					

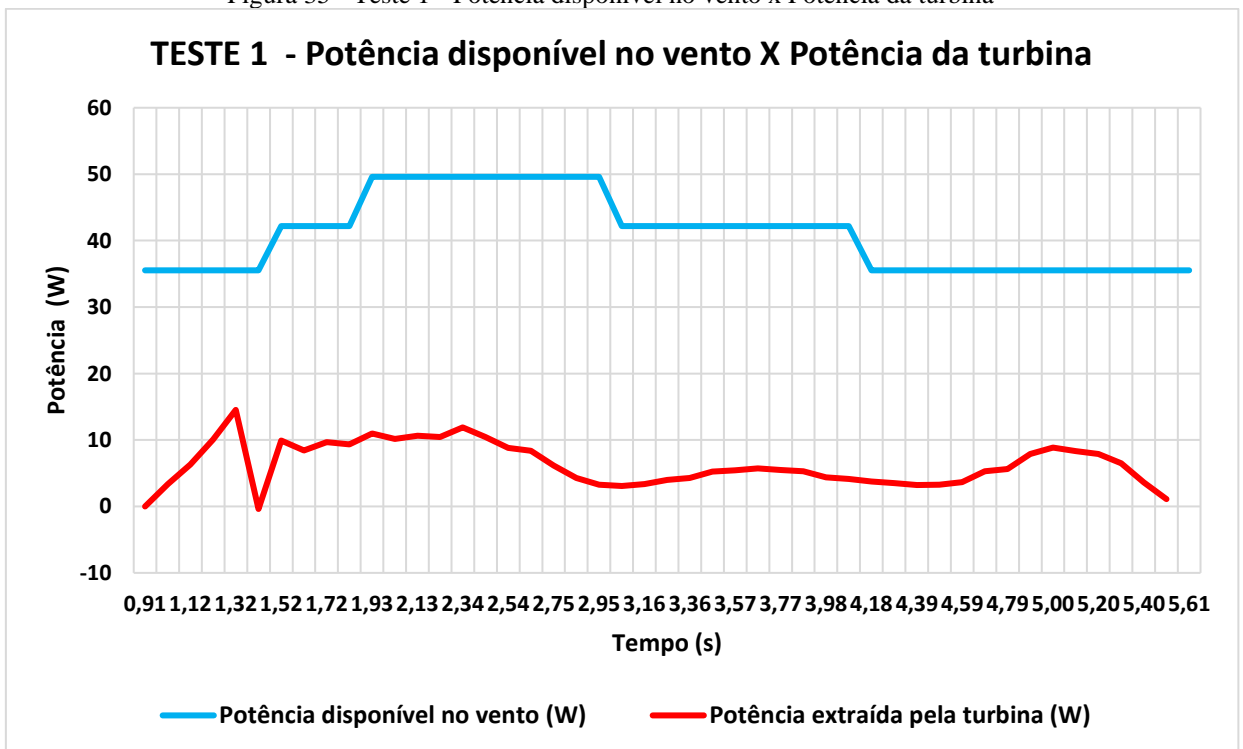
Fonte: Autor (2024).

Figura 34 - Teste 1 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina



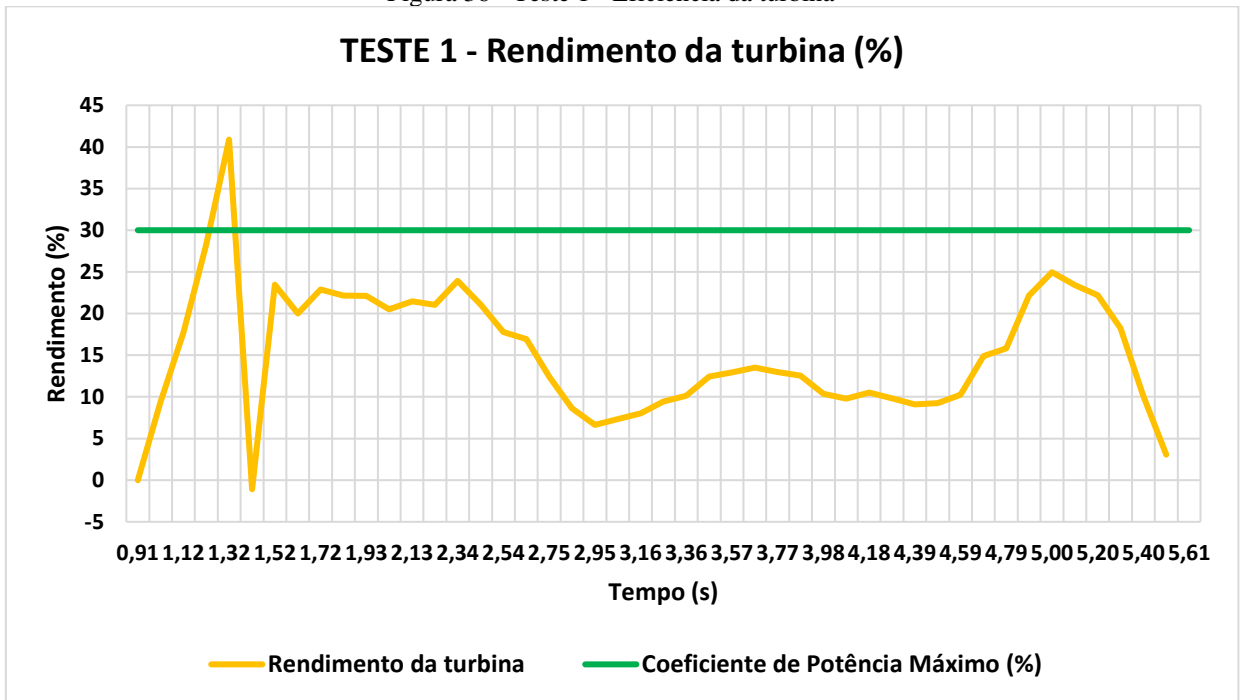
Fonte: Autor (2024).

Figura 35 - Teste 1 - Potência disponível no vento x Potência da turbina



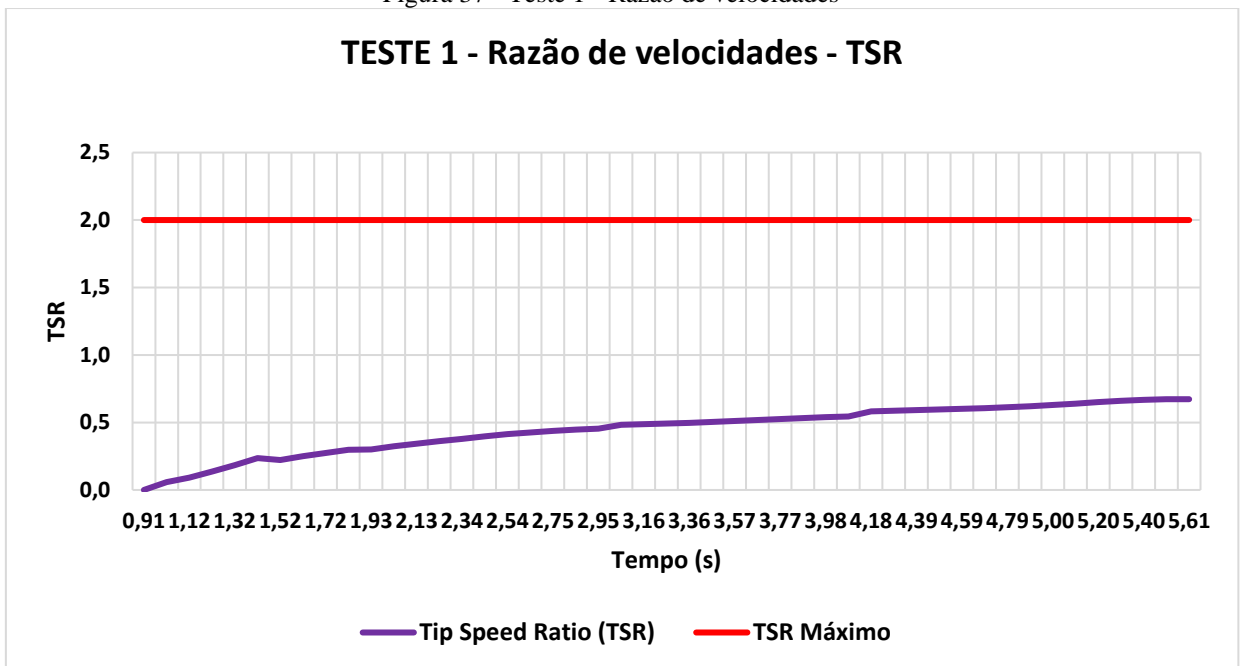
Fonte: Autor (2024).

Figura 36 - Teste 1 - Eficiência da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 37 - Teste 1 - Razão de velocidades



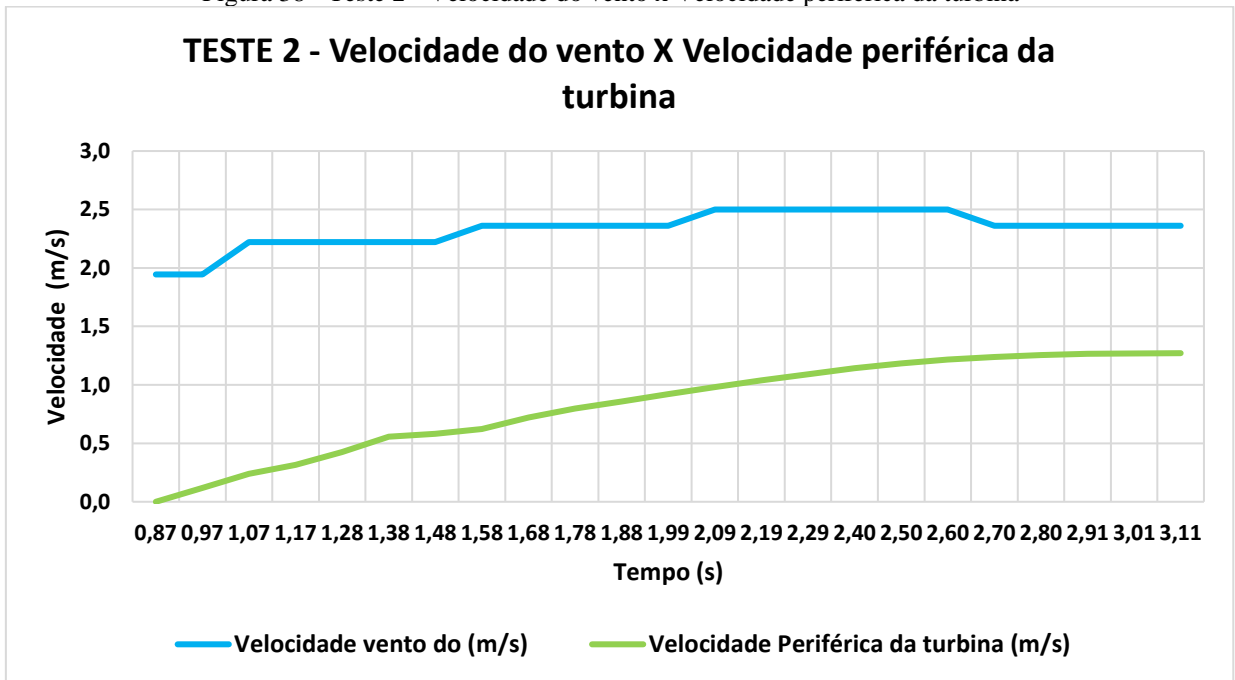
Fonte: Autor (2024).

Tabela 4 - Resultados teste 2

Tempo (s)	Rotação (Rpm)	Velocidade vento do (m/s)	Velocidade Periférica da turbina (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR)	Potência disponível no vento (W)	Velocidade Angular (Rad/s)	Energia (J)	Varição de energia (J)	Varição do tempo (s)	Potência extraída pela turbina (W)	Rendimento da turbina	Porcentagem (%)
0,87	0	1,94	0,00	0,00	19,84	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
0,97	0,91	1,94	0,12	0,06	19,84	0,10	0,17	0,51	0,10	5,05	0,25	25,46
1,07	1,83	2,22	0,24	0,11	29,62	0,19	0,68	0,50	0,11	4,74	0,16	16,01
1,17	2,41	2,22	0,32	0,14	29,62	0,25	1,18	0,95	0,10	9,31	0,31	31,42
1,28	3,24	2,22	0,42	0,19	29,62	0,34	2,13	1,53	0,10	15,16	0,51	51,19
1,38	4,25	2,22	0,56	0,25	29,62	0,45	3,66	0,35	0,10	3,42	0,12	11,55
1,48	4,45	2,22	0,58	0,26	29,62	0,47	4,01	0,56	0,10	5,53	0,19	18,68
1,58	4,75	2,36	0,62	0,26	35,53	0,50	4,57	1,56	0,10	15,26	0,43	42,95
1,68	5,5	2,36	0,72	0,30	35,53	0,58	6,12	1,38	0,10	13,71	0,39	38,58
1,78	6,09	2,36	0,80	0,34	35,53	0,64	7,51	1,20	0,10	11,92	0,34	33,54
1,88	6,56	2,36	0,86	0,36	35,53	0,69	8,71	1,29	0,10	12,68	0,36	35,68
1,99	7,03	2,36	0,92	0,39	35,53	0,74	10,01	1,38	0,10	13,55	0,38	38,15
2,09	7,5	2,50	0,98	0,39	42,18	0,79	11,39	1,38	0,10	13,35	0,32	31,66
2,19	7,94	2,50	1,04	0,42	42,18	0,83	12,76	1,32	0,10	12,80	0,30	30,35
2,29	8,34	2,50	1,09	0,44	42,18	0,87	14,08	1,35	0,10	13,09	0,31	31,03
2,40	8,73	2,50	1,14	0,46	42,18	0,91	15,43	1,12	0,10	11,04	0,26	26,18
2,50	9,04	2,50	1,18	0,47	42,18	0,95	16,55	0,93	0,10	9,10	0,22	21,57
2,60	9,29	2,50	1,22	0,49	42,18	0,97	17,47	0,68	0,10	6,64	0,16	15,74
2,70	9,47	2,36	1,24	0,53	35,53	0,99	18,16	0,46	0,10	4,58	0,13	12,90
2,80	9,59	2,36	1,26	0,53	35,53	1,00	18,62	0,27	0,10	2,67	0,08	7,53
2,91	9,66	2,36	1,26	0,54	35,53	1,01	18,89	0,16	0,10	1,55	0,04	4,37
3,01	9,7	2,36	1,27	0,54	35,53	1,02	19,05	0,04	0,10	0,39	0,01	1,10
3,11	9,71	2,36	1,27	0,54	35,53	1,02	19,09					

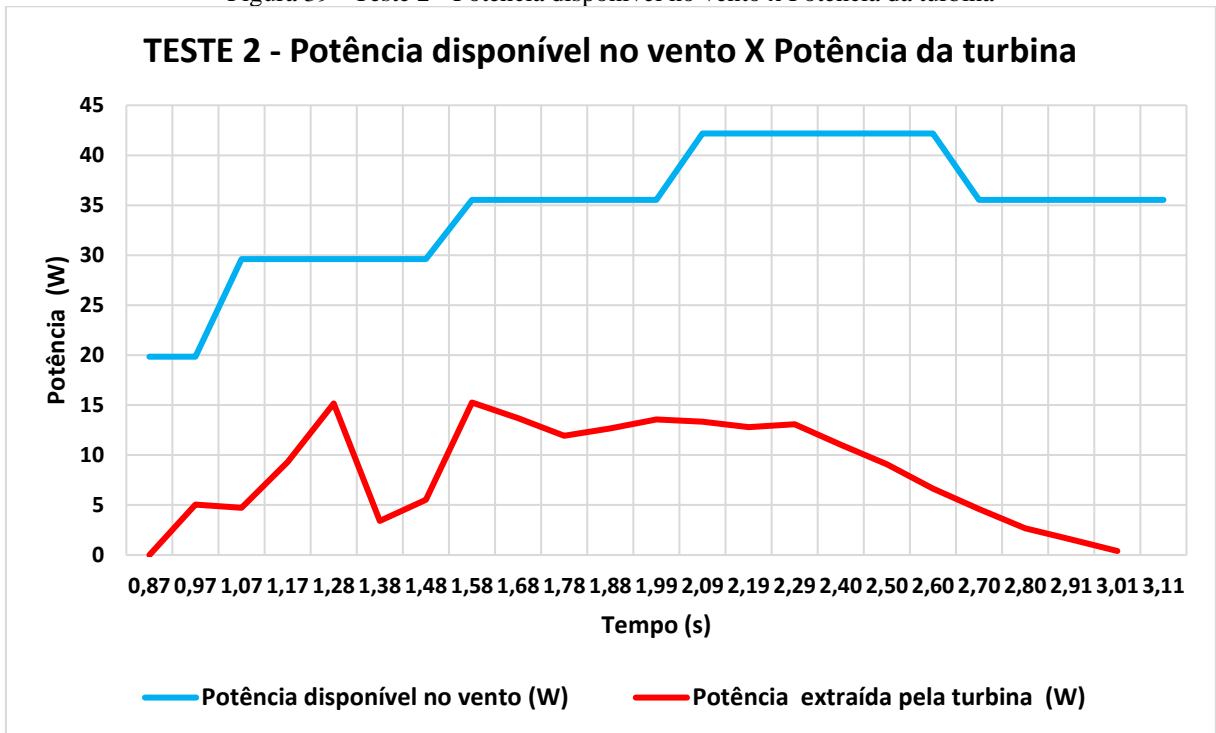
Fonte: Autor (2024).

Figura 38 - Teste 2 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina



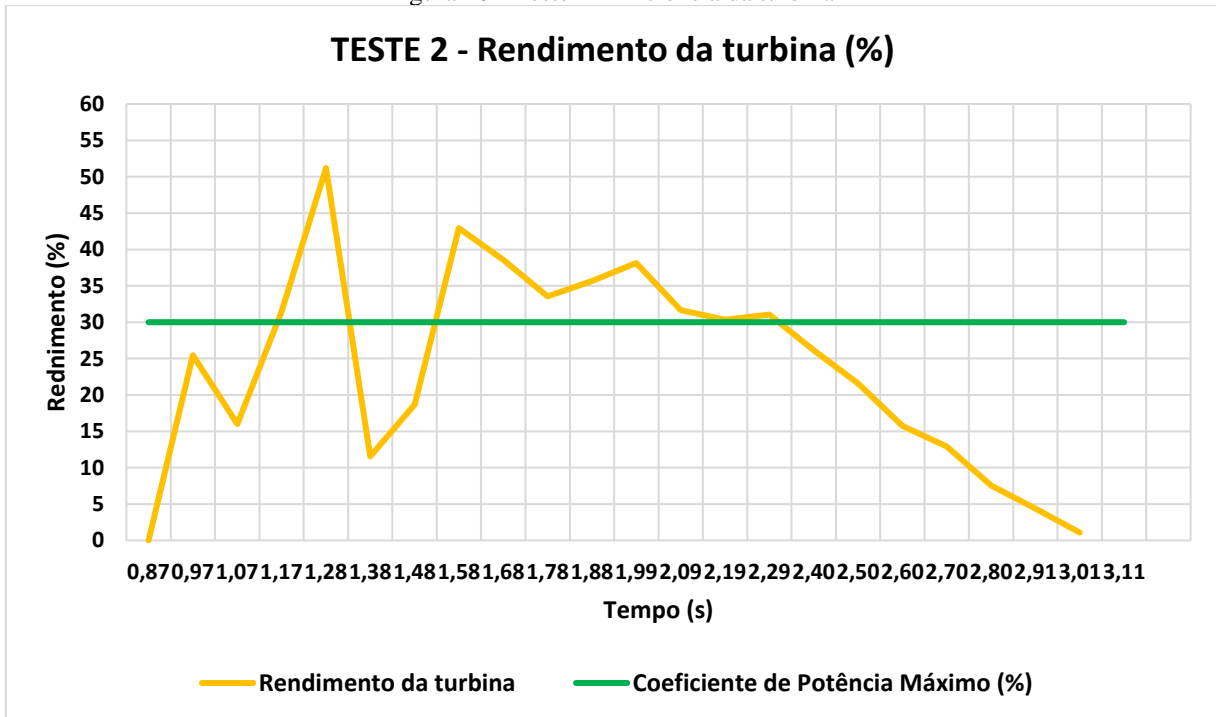
Fonte: Autor (2024).

Figura 39 - Teste 2 - Potência disponível no vento x Potência da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 40 - Teste 2 - Eficiência da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 41 - Teste 2 - Razão de velocidades

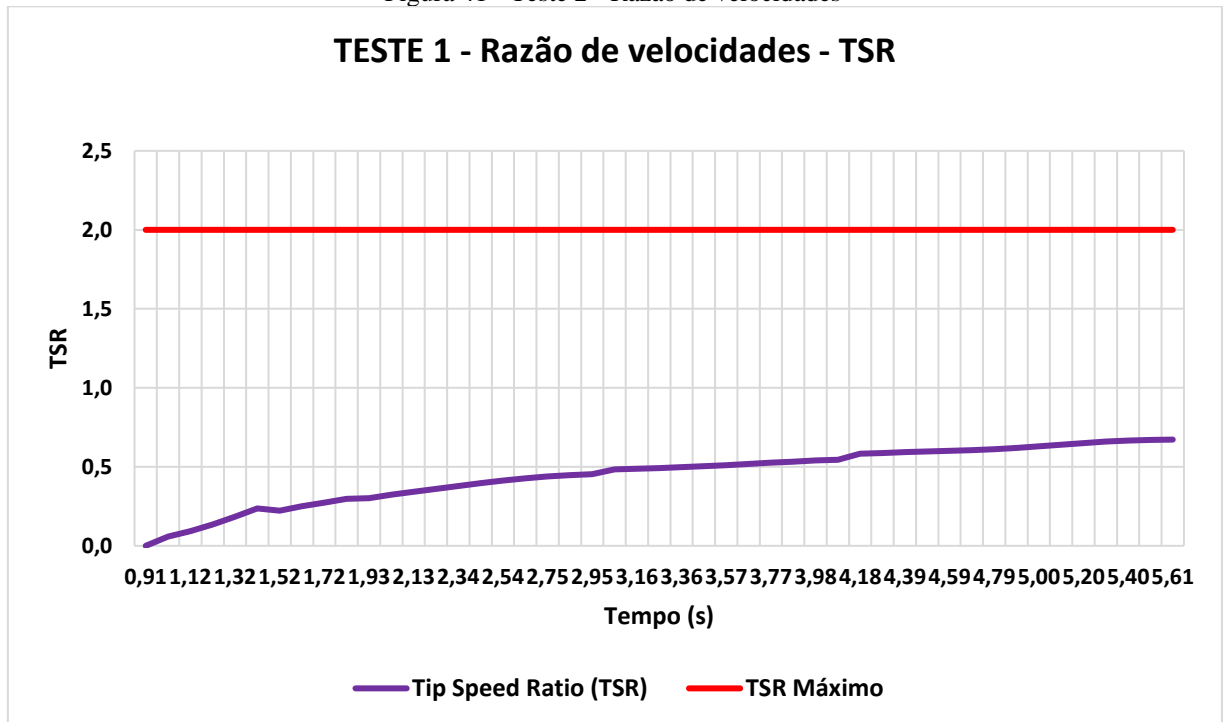
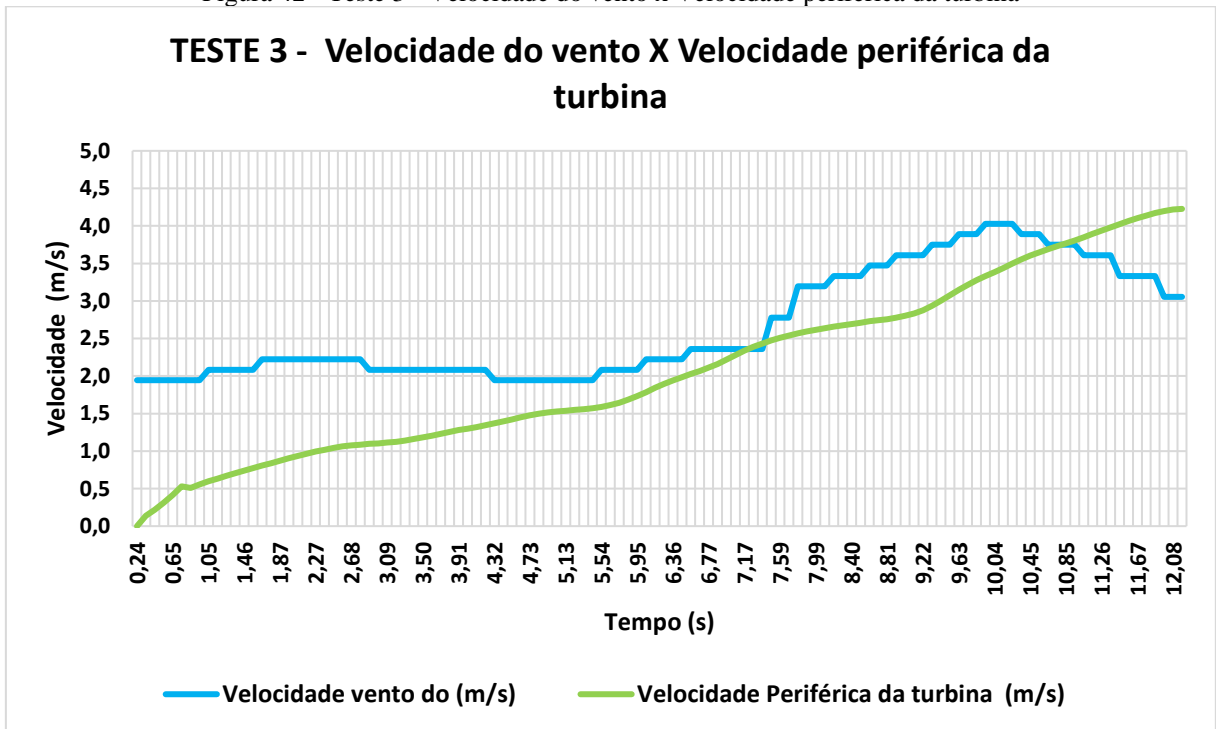


Tabela 5 - Resultados teste 3

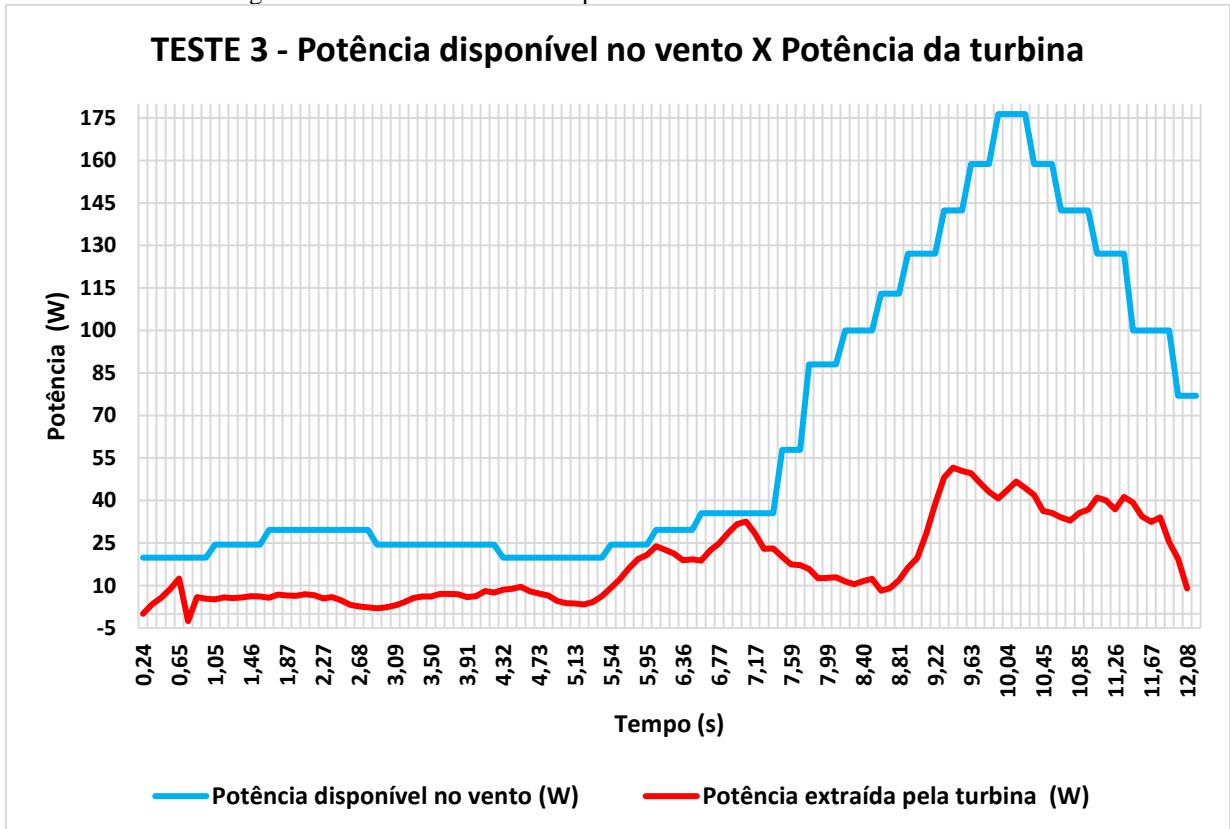
Tempo (s)	Rotação (Rpm)	Velocidade vento do (m/s)	Velocidade Periférica da turbina (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR)	Potência disponível no vento (W)	Velocidade Angular (Rad/s)	Energia (J)	Varição de energia (J)	Varição do tempo (s)	Potência extraída pela turbina (W)	Rendimento da turbina	Porcentagem (%)
0.24	0	1,94	0,00	0,00	19,84	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
0.34	1,06	1,94	0,14	0,07	19,84	0,11	0,23	0,33	0,10	3,27	0,16	16,49
0.44	1,65	1,94	0,22	0,11	19,84	0,17	0,56	0,59	0,10	5,72	0,29	28,81
0.54	2,38	1,94	0,31	0,16	19,84	0,25	1,15	0,90	0,10	8,74	0,44	44,06
0.65	3,18	1,94	0,42	0,21	19,84	0,33	2,05	1,26	0,10	12,45	0,63	62,72
0.75	4,04	1,94	0,53	0,27	19,84	0,42	3,30	-0,26	0,10	-2,54	-0,13	-12,80
0.85	3,88	1,94	0,51	0,26	19,84	0,41	3,05	0,61	0,10	5,97	0,30	30,09
0.95	4,25	1,94	0,56	0,29	19,84	0,45	3,66	0,55	0,10	5,37	0,27	27,05
1.05	4,56	2,08	0,60	0,29	24,41	0,48	4,21	0,51	0,10	5,08	0,21	20,82
1.15	4,83	2,08	0,63	0,30	24,41	0,51	4,72	0,58	0,10	5,78	0,24	23,70
1.26	5,12	2,08	0,67	0,32	24,41	0,54	5,31	0,57	0,10	5,63	0,23	23,08
1.36	5,39	2,08	0,71	0,34	24,41	0,56	5,88	0,58	0,10	5,75	0,24	23,57
1.46	5,65	2,08	0,74	0,35	24,41	0,59	6,46	0,63	0,10	6,26	0,26	25,66
1.56	5,92	2,08	0,77	0,37	24,41	0,62	7,10	0,64	0,10	6,18	0,25	25,34
1.66	6,18	2,22	0,81	0,36	29,62	0,65	7,73	0,59	0,10	5,69	0,19	19,22
1.77	6,41	2,22	0,84	0,38	29,62	0,67	8,32	0,69	0,10	6,82	0,23	23,01
1.87	6,67	2,22	0,87	0,39	29,62	0,70	9,01	0,66	0,10	6,47	0,22	21,84
1.97	6,91	2,22	0,90	0,41	29,62	0,72	9,67	0,65	0,10	6,35	0,21	21,44
2.07	7,14	2,22	0,93	0,42	29,62	0,75	10,32	0,71	0,10	6,99	0,24	23,58
2.17	7,38	2,22	0,97	0,43	29,62	0,77	11,03	0,67	0,10	6,61	0,22	22,30
2.27	7,6	2,22	0,99	0,45	29,62	0,80	11,69	0,56	0,10	5,49	0,19	18,55
2.38	7,78	2,22	1,02	0,46	29,62	0,81	12,25	0,61	0,10	5,88	0,20	19,86
2.48	7,97	2,22	1,04	0,47	29,62	0,83	12,86	0,49	0,10	4,79	0,16	16,17
2.58	8,12	2,22	1,06	0,48	29,62	0,85	13,35	0,33	0,10	3,21	0,11	10,84
2.68	8,22	2,22	1,08	0,48	29,62	0,86	13,88	0,27	0,10	2,62	0,09	9,09
2.79	8,3	2,22	1,09	0,49	29,62	0,87	13,95	0,24	0,10	2,34	0,08	7,90
2.89	8,37	2,08	1,10	0,53	24,41	0,88	14,18	0,20	0,10	1,98	0,08	8,12
2.99	8,43	2,08	1,10	0,53	24,41	0,88	14,39	0,24	0,10	2,35	0,10	9,64
3.09	8,5	2,08	1,11	0,53	24,41	0,89	14,63	0,31	0,10	3,02	0,12	12,39
3.20	8,59	2,08	1,12	0,54	24,41	0,90	14,94	0,42	0,10	4,08	0,17	16,72
3.30	8,71	2,08	1,14	0,55	24,41	0,91	15,36	0,57	0,10	5,53	0,23	22,65
3.40	8,91	2,08	1,16	0,56	24,41	0,93	15,93	0,62	0,10	6,10	0,24	24,44
3.50	9,04	2,08	1,18	0,57	24,41	0,95	16,55	0,63	0,10	6,16	0,25	25,23
3.60	9,21	2,08	1,21	0,58	24,41	0,96	17,17	0,72	0,10	7,02	0,29	28,76
3.71	9,4	2,08	1,23	0,59	24,41	0,98	17,89	0,73	0,10	7,09	0,29	29,06
3.81	9,59	2,08	1,26	0,60	24,41	1,00	18,62	0,71	0,10	6,99	0,29	28,62
3.91	9,77	2,08	1,28	0,61	24,41	1,02	19,33	0,60	0,10	5,92	0,24	24,26
4.01	9,92	2,08	1,30	0,62	24,41	1,04	19,92	0,65	0,10	6,29	0,26	25,77
4.11	10,08	2,08	1,32	0,63	24,41	1,06	20,57	0,68	0,10	6,85	0,28	28,33
4.22	10,28	2,08	1,35	0,65	24,41	1,08	21,40	0,76	0,10	7,48	0,31	30,66
4.32	10,46	1,94	1,37	0,70	19,84	1,10	22,15	0,86	0,10	8,47	0,43	42,67
4.42	10,66	1,94	1,40	0,72	19,84	1,12	23,01	0,92	0,10	8,89	0,45	44,78
4.52	10,87	1,94	1,42	0,73	19,84	1,14	23,92	0,98	0,10	9,59	0,48	48,32
4.62	11,09	1,94	1,45	0,75	19,84	1,16	24,90	0,81	0,10	7,91	0,40	39,87
4.73	11,27	1,94	1,48	0,76	19,84	1,18	25,71	0,74	0,10	7,21	0,36	36,33
4.83	11,43	1,94	1,50	0,77	19,84	1,20	26,45	0,65	0,10	6,45	0,33	32,58
4.93	11,57	1,94	1,51	0,78	19,84	1,21	27,10	0,57	0,10	4,57	0,27	23,02
5.03	11,67	1,94	1,53	0,79	19,84	1,22	27,57	0,38	0,10	3,76	0,19	18,93
5.13	11,75	1,94	1,54	0,79	19,84	1,23	27,95	0,38	0,11	3,64	0,18	18,33
5.24	11,83	1,94	1,55	0,80	19,84	1,24	28,33	0,34	0,10	3,30	0,17	16,61
5.34	11,9	1,94	1,56	0,80	19,84	1,25	28,67	0,44	0,10	4,27	0,22	21,51
5.44	11,99	1,94	1,57	0,81	19,84	1,26	29,11	0,63	0,10	6,28	0,32	31,66
5.54	12,12	2,08	1,59	0,82	24,41	1,27	29,74	0,94	0,10	9,21	0,38	37,75
5.64	12,21	2,08	1,61	0,82	24,41	1,27	30,58	1,26	0,10	12,84	0,45	50,25
5.75	12,56	2,08	1,64	0,79	24,41	1,32	31,94	1,65	0,10	16,16	0,66	66,20
5.85	12,88	2,08	1,69	0,81	24,41	1,35	33,59	1,96	0,10	19,38	0,79	79,40
5.95	13,25	2,08	1,73	0,83	24,41	1,39	35,54	2,12	0,10	20,82	0,85	85,28
6.05	13,64	2,22	1,79	0,80	29,62	1,43	37,67	2,41	0,10	23,88	0,81	80,63
6.15	14,07	2,22	1,84	0,83	29,62	1,47	40,08	2,31	0,10	22,66	0,76	76,50
6.26	14,47	2,22	1,89	0,85	29,62	1,52	42,39	2,20	0,10	21,32	0,72	71,96
6.36	14,84	2,22	1,94	0,87	29,62	1,54	44,59	1,94	0,10	19,84	0,64	64,84
6.46	15,16	2,22	1,98	0,89	29,62	1,59	46,53	1,99	0,10	19,27	0,65	65,06
6.56	15,48	2,36	2,03	0,86	35,53	1,62	48,51	1,90	0,10	18,80	0,53	52,91
6.66	15,78	2,36	2,07	0,87	35,53	1,65	50,41	2,26	0,10	22,39	0,63	63,01
6.77	16,13	2,36	2,11	0,89	35,53	1,69	52,67	2,51	0,10	24,86	0,70	69,98
6.87	16,51	2,36	2,16	0,92	35,53	1,73	55,19	2,91	0,10	28,55	0,80	80,35
6.97	16,94	2,36	2,22	0,94	35,53	1,77	58,10	3,20	0,10	31,66	0,89	89,12
7.07	17,4	2,36	2,28	0,96	35,53	1,82	61,36	3,36	0,10	35,02	0,96	96,17
7.17	17,87	2,36	2,34	0,99	35,53	1,87	64,65	2,93	0,10	28,41	0,80	79,97
7.28	18,27	2,36	2,39	1,01	35,53	1,91	67,58	2,39	0,10	22,96	0,65	64,63
7.38	18,59	2,36	2,43	1,03	35,53	1,95	69,97	2,35	0,10	23,07	0,65	64,93
7.48	18,9	2,78	2,47	0,89	57,85	1,98	72,32	2,08	0,10	20,20	0,35	34,92
7.59	19,17	2,78	2,51	0,90	57,85	2,01	74,40	1,80	0,10	17,44	0,30	30,14
7.69	19,4	2,78	2,54	0,91	57,85	2,03	76,20	1,74	0,10	17,21	0,30	29,74
7.79	19,62	3,19	2,57	0,80	87,99	2,05	77,93	1,60	0,10	15,81	0,27	27,17
7.89	19,82	3,19	2,59	0,81	87,99	2,08	79,53	1,29	0,10	12,64	0,14	14,37
7.99	19,98	3,19	2,62	0,82	87,99	2,09	80,82	1,30	0,10	12,74	0,14	14,48
8.09	20,14	3,19	2,64	0,83	87,99	2,11	82,12	1,31	0,10	12,97	0,14	14,74
8.20	20,3	3,33	2,66	0,80	99,97	2,13	83,43	1,15	0,10	11,43	0,11	11,44
8.30	20,44	3,33	2,68	0,80	99,97	2,14	84,59	1,08	0,10	10,48	0,10	10,48
8.40	20,57	3,33	2,69	0,81	99,97	2,15	85,66	1,17	0,10	11,58	0,12	11,59
8.50	20,71	3,33	2,71	0,81	99,97	2,16	86,83	1,26	0,10	12,38	0,12	12,38
8.60	20,86	3,47	2,73	0,79	113,00	2,18	88,10	0,85	0,10	8,22	0,07	7,27
8.71	20,96	3,47	2,74	0,79	113,00	2,19	88,94	0,94	0,10	9,09	0,08	8,04
8.81	21,07	3,47	2,76	0,79	113,00	2,21	89,88	1,20	0,10	11,87	0,11	10,50
8.91	21,21	3,61	2,78	0,77	127,11	2,22	91,08	1,73	0,11	16,28	0,13	12,81
9.01	21,41	3,61	2,80	0,78	127,11	2,24	92,80	2,00	0,10	19,65	0,15	15,46
9.12	21,64	3,61	2,83	0,78	127,11	2,27	94,81	2,91	0,10	28,29	0,22	22,26
9.22	21,97	3,61	2,88	0,80	127,11	2,30	97,72	3,95	0,10	38,76	0,30	30,49
9.32	22,41	3,75	2,95	0,78	142,34	2,35	101,68	4,87	0,10	48,38	0,34	33,85
9.42	22,94	3,75	3,00	0,80	142,34	2,40	106,54	5,27	0,10	51,62	0,36	36,26
9.52	23,5	3,75	3,08	0,82	142,34	2,46	111,81	5,20	0,10	50,46	0,35	35,45
9.63	24,04	3,89	3,15	0,81	158,75	2,52	117,00	5,02	0,10	49,67	0,31	31,29
9.73	24,55	3,89	3,21	0,83	158,75	2,57	122,02	4,72	0,10	46,24	0,29	29,13
9.83	25,02	3,89	3,28	0,84	158,75	2,62	126,74	4,39	0,10	43,08	0,27	27,13
9.93	25,45	4,03	3,33	0,83	176,38	2,67	131,13	4,15	0,10	40,73	0,23	23,09

Figura 42 - Teste 3 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina



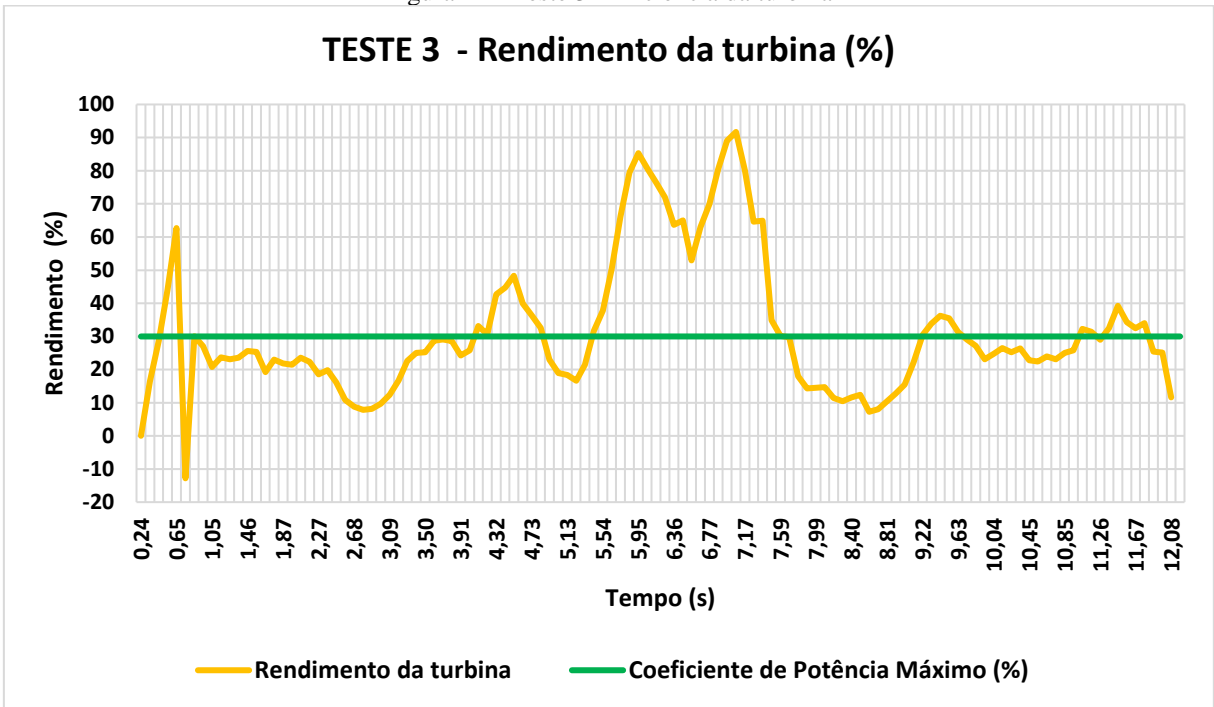
Fonte: Autor (2024).

Figura 43 - Teste 3 - Potência disponível no vento x Potência da turbina



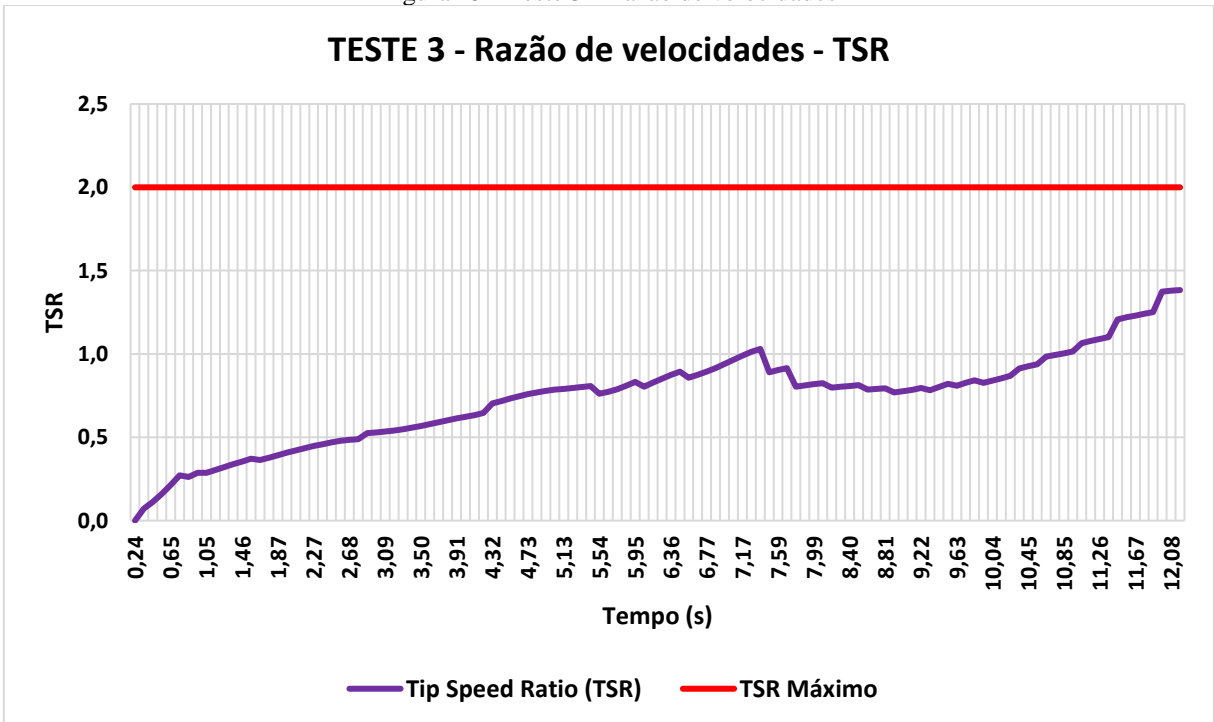
Fonte: Autor (2024).

Figura 44 - Teste 3 - Eficiência da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 45 - Teste 3 - Razão de velocidades



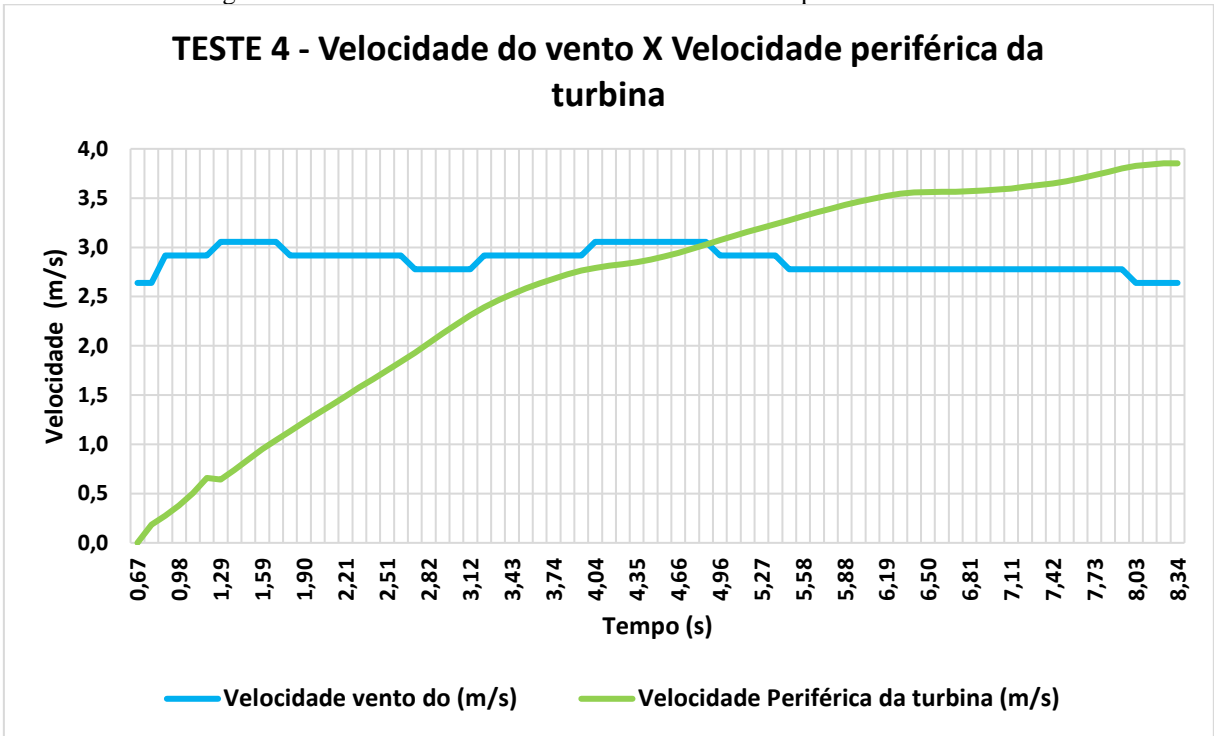
Fonte: Autor (2024).

Tabela 6 - Resultados teste 4

Tempo (s)	Rotação (Rpm)	Velocidade vento do (m/s)	Velocidade Periférica da turbina (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR)	Potência disponível no vento (W)	Velocidade Angular (Rad/s)	Energia (J)	Varição de energia (J)	Varição do tempo (s)	Potência extraída pela turbina (W)	Rendimento da turbina	Porcentagem (%)
0,67	0,00	2,64	0,00	0,00	49,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,78	1,41	2,64	0,18	0,07	49,60	0,15	0,40	0,50	0,10	4,88	0,10	9,84
0,88	2,11	2,92	0,28	0,09	66,97	0,22	0,90	0,80	0,10	7,84	0,12	11,71
0,98	2,90	2,92	0,38	0,13	66,97	0,30	1,70	1,29	0,10	12,69	0,19	18,94
1,08	3,85	2,92	0,50	0,17	66,97	0,40	3,00	2,14	0,10	20,78	0,31	31,02
1,19	5,04	2,92	0,66	0,23	66,97	0,53	5,14	-0,24	0,10	-2,37	-0,04	-3,54
1,29	4,92	3,06	0,64	0,21	77,00	0,51	4,89	1,57	0,10	15,57	0,20	20,22
1,39	5,65	3,06	0,74	0,24	77,00	0,59	6,47	1,99	0,10	19,68	0,26	25,56
1,49	6,46	3,06	0,85	0,28	77,00	0,68	8,45	2,25	0,10	21,88	0,28	28,42
1,59	7,27	3,06	0,95	0,31	77,00	0,76	10,71	2,13	0,10	20,64	0,27	26,81
1,70	7,96	3,06	1,04	0,34	77,00	0,83	12,83	2,35	0,10	22,99	0,30	29,86
1,80	8,66	2,92	1,13	0,39	66,97	0,91	15,18	2,57	0,10	25,20	0,38	37,63
1,90	9,36	2,92	1,23	0,42	66,97	0,98	17,75	2,59	0,10	25,36	0,38	37,87
2,00	10,02	2,92	1,31	0,45	66,97	1,05	20,34	2,76	0,10	27,09	0,40	40,44
2,11	10,68	2,92	1,40	0,48	66,97	1,12	23,10	3,04	0,10	29,83	0,45	44,55
2,21	11,36	2,92	1,49	0,51	66,97	1,19	26,14	3,31	0,10	32,73	0,49	48,86
2,31	12,06	2,92	1,58	0,54	66,97	1,26	29,45	3,23	0,10	31,97	0,48	47,73
2,41	12,70	2,92	1,66	0,57	66,97	1,33	32,68	3,60	0,10	35,31	0,53	52,72
2,51	13,39	2,92	1,75	0,60	66,97	1,40	36,28	3,62	0,10	35,46	0,53	52,95
2,61	14,04	2,92	1,84	0,63	66,97	1,47	39,90	4,15	0,10	41,09	0,61	61,36
2,71	14,75	2,78	1,93	0,70	57,85	1,54	44,05	4,45	0,10	44,07	0,76	76,17
2,82	15,48	2,78	2,03	0,73	57,85	1,62	48,50	4,76	0,10	46,26	0,80	79,95
2,92	16,22	2,78	2,12	0,76	57,85	1,70	53,26	4,83	0,10	47,84	0,83	82,69
3,02	16,94	2,78	2,22	0,80	57,85	1,77	58,09	4,93	0,10	47,89	0,83	82,78
3,12	17,64	2,78	2,31	0,83	57,85	1,85	63,03	4,57	0,10	45,27	0,78	78,25
3,22	18,27	2,92	2,39	0,82	66,97	1,91	67,60	4,10	0,10	39,77	0,59	59,38
3,33	18,82	2,92	2,46	0,84	66,97	1,97	71,69	3,51	0,10	33,71	0,50	50,33
3,43	19,27	2,92	2,52	0,86	66,97	2,02	75,20	3,53	0,10	34,94	0,52	52,16
3,53	19,72	2,92	2,58	0,89	66,97	2,07	78,73	3,24	0,10	32,07	0,48	47,88
3,63	20,12	2,92	2,63	0,90	66,97	2,11	81,97	2,99	0,10	29,02	0,43	43,34
3,74	20,48	2,92	2,68	0,92	66,97	2,15	84,96	2,79	0,10	27,06	0,40	40,41
3,84	20,82	2,92	2,73	0,93	66,97	2,18	87,74	2,51	0,10	23,89	0,36	35,67
3,94	21,11	2,92	2,76	0,95	66,97	2,21	90,25	1,76	0,10	17,40	0,26	25,98
4,04	21,32	3,06	2,79	0,91	77,00	2,23	92,01	1,44	0,10	14,02	0,18	18,21
4,15	21,48	3,06	2,81	0,92	77,00	2,25	93,45	1,12	0,10	11,02	0,14	14,31
4,25	21,61	3,06	2,83	0,93	77,00	2,26	94,58	1,26	0,10	12,51	0,16	16,25
4,35	21,76	3,06	2,85	0,93	77,00	2,28	95,84	1,81	0,10	17,75	0,23	23,05
4,45	21,96	3,06	2,87	0,94	77,00	2,30	97,65	2,24	0,10	21,71	0,28	28,19
4,56	22,21	3,06	2,91	0,95	77,00	2,33	99,89	2,54	0,10	24,87	0,32	32,30
4,66	22,49	3,06	2,94	0,96	77,00	2,36	102,42	2,78	0,10	27,24	0,35	35,37
4,76	22,80	3,06	2,98	0,98	77,00	2,39	105,20	3,17	0,10	31,39	0,41	40,76
4,86	23,14	3,06	3,03	0,99	77,00	2,42	108,37	3,22	0,10	31,85	0,41	41,37
4,96	23,48	2,92	3,07	1,05	66,97	2,46	111,59	3,12	0,10	30,57	0,46	45,65
5,06	23,80	2,92	3,12	1,07	66,97	2,49	114,71	3,09	0,10	29,97	0,45	44,75
5,17	24,12	2,92	3,16	1,08	66,97	2,53	117,80	2,90	0,10	28,19	0,42	42,09
5,27	24,42	2,92	3,20	1,10	66,97	2,56	120,70	2,94	0,10	28,53	0,43	42,60
5,37	24,71	2,92	3,23	1,11	66,97	2,59	123,64	3,13	0,10	30,97	0,46	46,24
5,47	25,02	2,78	3,28	1,18	57,85	2,62	126,77	3,24	0,10	31,50	0,54	54,44
5,58	25,34	2,78	3,32	1,19	57,85	2,65	130,01	2,97	0,10	29,41	0,51	50,84
5,68	25,63	2,78	3,35	1,21	57,85	2,68	132,98	3,00	0,10	29,17	0,50	50,42
5,78	25,92	2,78	3,39	1,22	57,85	2,71	135,98	2,96	0,10	28,71	0,50	49,63
5,88	26,20	2,78	3,43	1,23	57,85	2,74	138,94	2,75	0,10	26,92	0,47	46,53
5,99	26,45	2,78	3,46	1,25	57,85	2,77	141,69	2,53	0,10	25,02	0,43	43,24
6,09	26,69	2,78	3,49	1,26	57,85	2,79	144,21	2,38	0,10	23,37	0,40	40,40
6,19	26,91	2,78	3,52	1,27	57,85	2,82	146,60	1,82	0,10	17,69	0,31	30,57
6,29	27,08	2,78	3,54	1,28	57,85	2,84	148,42	1,00	0,10	9,69	0,17	16,75
6,39	27,17	2,78	3,56	1,28	57,85	2,84	149,42	0,50	0,10	4,86	0,08	8,40
6,50	27,21	2,78	3,56	1,28	57,85	2,85	149,92	0,25	0,10	2,48	0,04	4,29
6,60	27,23	2,78	3,57	1,28	57,85	2,85	150,17	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
6,70	27,23	2,78	3,57	1,28	57,85	2,85	150,17	0,33	0,10	3,28	0,06	5,67
6,81	27,27	2,78	3,57	1,28	57,85	2,86	150,50	0,75	0,10	7,25	0,13	12,53
6,91	27,33	2,78	3,58	1,29	57,85	2,86	151,26	0,67	0,10	6,58	0,11	11,38
7,01	27,39	2,78	3,59	1,29	57,85	2,87	151,93	0,93	0,10	9,08	0,16	15,69
7,11	27,48	2,78	3,60	1,29	57,85	2,88	152,85	1,52	0,10	14,62	0,25	25,28
7,22	27,61	2,78	3,61	1,30	57,85	2,89	154,38	1,44	0,10	14,29	0,25	24,70
7,32	27,74	2,78	3,63	1,31	57,85	2,91	155,82	1,45	0,10	14,36	0,25	24,82
7,42	27,87	2,78	3,65	1,31	57,85	2,92	157,27	1,97	0,10	19,15	0,33	33,10
7,52	28,05	2,78	3,67	1,32	57,85	2,94	159,24	2,68	0,10	26,26	0,45	45,38
7,62	28,28	2,78	3,70	1,33	57,85	2,96	161,92	2,70	0,10	26,74	0,46	46,21
7,73	28,52	2,78	3,73	1,34	57,85	2,99	164,62	2,99	0,10	29,00	0,50	50,13
7,83	28,77	2,78	3,77	1,36	57,85	3,01	167,61	3,01	0,10	29,84	0,52	51,59
7,93	29,03	2,78	3,80	1,37	57,85	3,04	170,62	2,32	0,10	22,34	0,39	38,61
8,03	29,23	2,64	3,83	1,45	49,60	3,06	172,95	1,44	0,10	14,23	0,29	28,69
8,13	29,35	2,64	3,84	1,46	49,60	3,07	174,38	0,90	0,10	8,75	0,18	17,64
8,24	29,42	2,64	3,85	1,46	49,60	3,08	175,28	0,09	0,10	0,86	0,02	1,73
8,34	29,43	2,64	3,85	1,46	49,60	3,08	175,37					

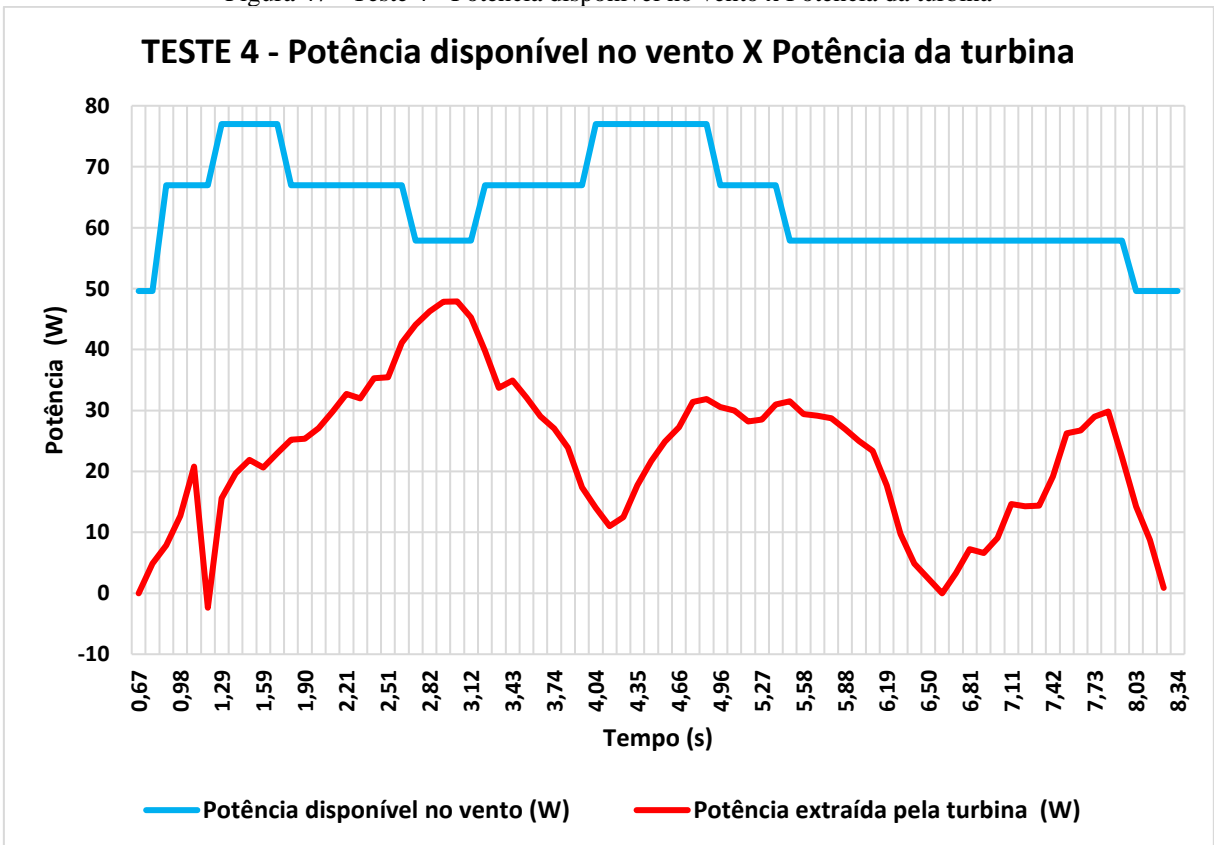
Fonte: Autor (2024).

Figura 46 - Teste 4 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina



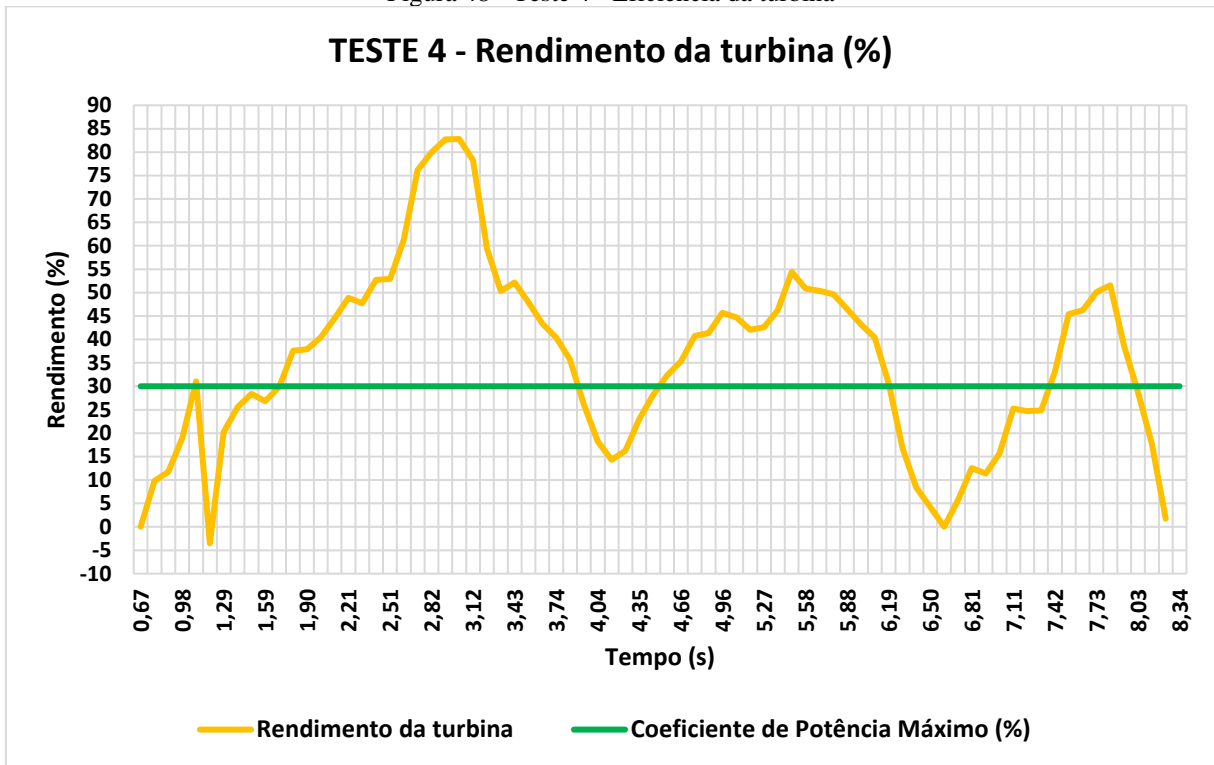
Fonte: Autor (2024).

Figura 47 - Teste 4 - Potência disponível no vento x Potência da turbina



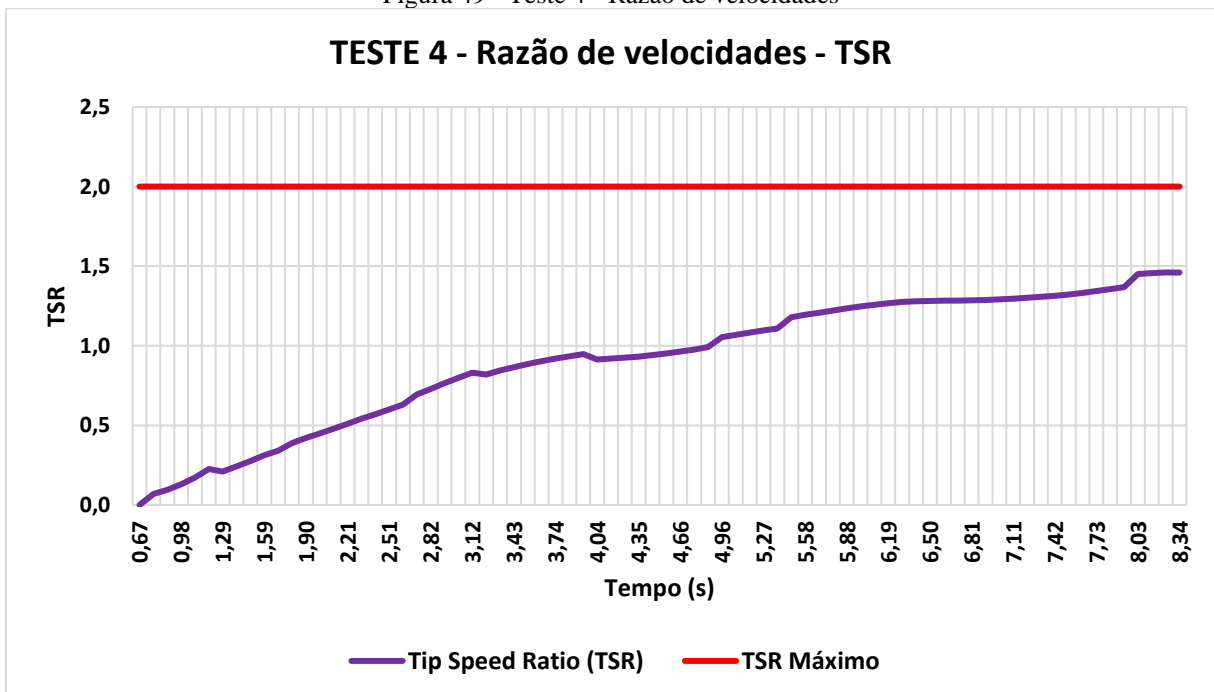
Fonte: Autor (2024).

Figura 48 - Teste 4 - Eficiência da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 49 - Teste 4 - Razão de velocidades



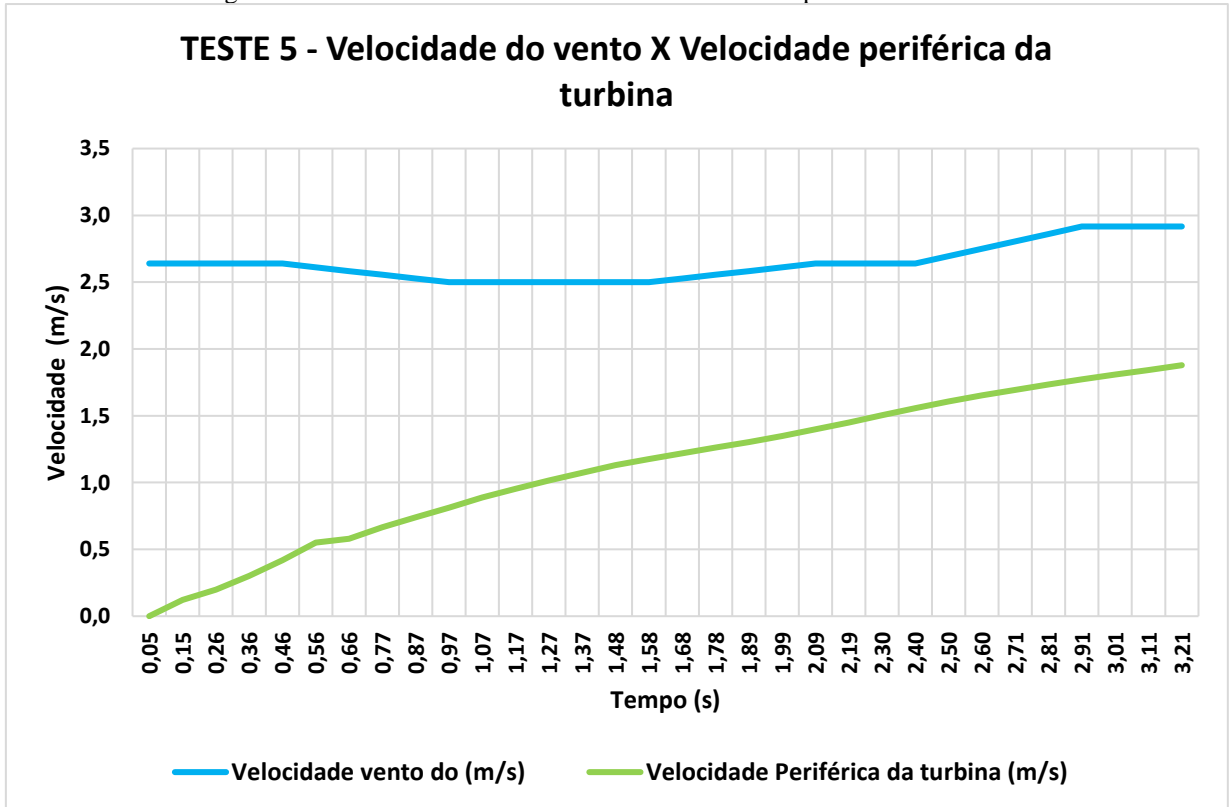
Fonte: Autor (2024).

Tabela 7 - Resultados teste 5

Tempo (s)	Rotação (Rpm)	Velocidade vento do (m/s)	Velocidade Periférica da turbina (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR)	Potência disponível no vento (W)	Velocidade Angular (Rad/s)	Energia (J)	Varição de energia (J)	Varição do tempo (s)	Potência extraída pela turbina (W)	Rendimento da turbina	Porcentagem (%)
0,05	0	2,64	0,00	0,00	49,60	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
0,15	0,94	2,64	0,12	0,05	49,60	0,10	0,18	0,29	0,10	2,86	0,06	5,77
0,26	1,52	2,64	0,20	0,08	49,60	0,16	0,47	0,61	0,10	6,01	0,12	12,11
0,36	2,31	2,64	0,30	0,11	49,60	0,24	1,08	1,01	0,10	9,86	0,20	19,88
0,46	3,21	2,64	0,42	0,16	49,60	0,34	2,09	1,50	0,10	14,58	0,29	29,40
0,56	4,21	2,61	0,55	0,21	48,05	0,44	3,59	0,38	0,10	3,81	0,08	7,93
0,66	4,43	2,58	0,58	0,22	46,54	0,46	3,97	1,27	0,10	12,47	0,27	26,80
0,77	5,09	2,56	0,67	0,26	45,05	0,53	5,25	1,22	0,10	12,06	0,27	26,76
0,87	5,65	2,53	0,74	0,29	43,60	0,59	6,46	1,32	0,10	12,94	0,30	29,67
0,97	6,2	2,50	0,81	0,32	42,18	0,65	7,78	1,52	0,10	14,94	0,35	35,43
1,07	6,78	2,50	0,89	0,35	42,18	0,71	9,31	1,42	0,10	14,09	0,33	33,41
1,17	7,28	2,50	0,95	0,38	42,18	0,76	10,73	1,46	0,10	14,47	0,34	34,31
1,27	7,76	2,50	1,02	0,41	42,18	0,81	12,19	1,39	0,10	13,75	0,33	32,60
1,37	8,19	2,50	1,07	0,43	42,18	0,86	13,58	1,50	0,10	14,84	0,35	35,17
1,48	8,63	2,50	1,13	0,45	42,18	0,90	15,08	1,28	0,10	12,47	0,30	29,56
1,58	8,99	2,50	1,18	0,47	42,18	0,94	16,36	1,22	0,10	11,99	0,28	28,44
1,68	9,32	2,53	1,22	0,48	43,60	0,98	17,59	1,27	0,10	12,55	0,29	28,78
1,78	9,65	2,56	1,26	0,49	45,05	1,01	18,85	1,23	0,11	11,72	0,26	26,02
1,89	9,96	2,58	1,30	0,50	46,54	1,04	20,08	1,39	0,10	13,54	0,29	29,10
1,99	10,3	2,61	1,35	0,52	48,05	1,08	21,48	1,61	0,10	15,67	0,33	32,61
2,09	10,68	2,64	1,40	0,53	49,60	1,12	23,09	1,76	0,10	17,28	0,35	34,83
2,19	11,08	2,64	1,45	0,55	49,60	1,16	24,85	1,87	0,10	18,19	0,37	36,67
2,30	11,49	2,64	1,50	0,57	49,60	1,20	26,73	1,94	0,10	19,03	0,38	38,37
2,40	11,9	2,64	1,56	0,59	49,60	1,25	28,67	1,81	0,10	17,75	0,36	35,79
2,50	12,27	2,69	1,61	0,60	52,80	1,28	30,48	1,76	0,10	17,29	0,33	32,75
2,60	12,62	2,75	1,65	0,60	56,14	1,32	32,24	1,66	0,10	16,23	0,29	28,92
2,71	12,94	2,81	1,69	0,60	59,61	1,36	33,90	1,64	0,10	16,27	0,27	27,30
2,81	13,25	2,86	1,73	0,61	63,22	1,39	35,54	1,63	0,10	15,96	0,25	25,24
2,91	13,55	2,92	1,77	0,61	66,97	1,42	37,17	1,44	0,10	14,12	0,21	21,08
3,01	13,81	2,92	1,81	0,62	66,97	1,45	38,61	1,52	0,10	14,95	0,22	22,32
3,11	14,08	2,92	1,84	0,63	66,97	1,47	40,14	1,55	0,10	15,24	0,23	22,75
3,21	14,35	2,92	1,88	0,64	66,97	1,50	41,69					

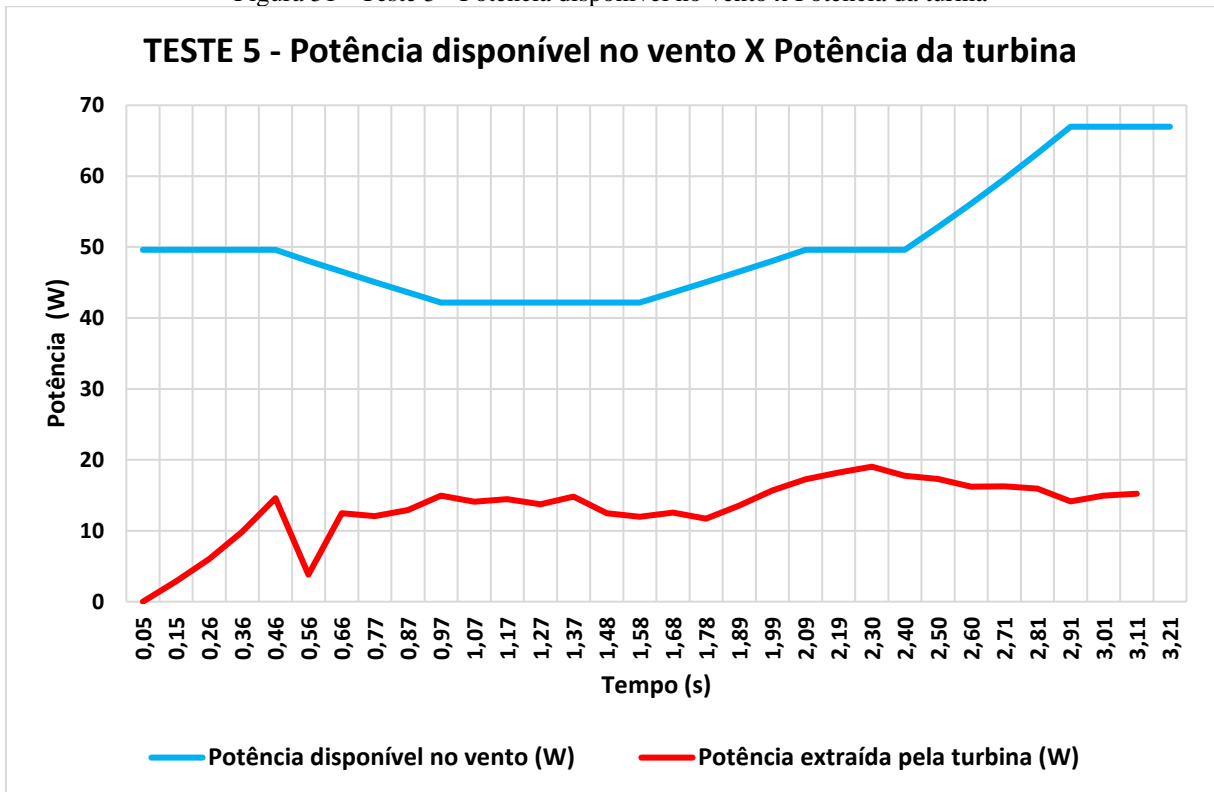
Fonte: Autor (2024).

Figura 50 - Teste 5 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina



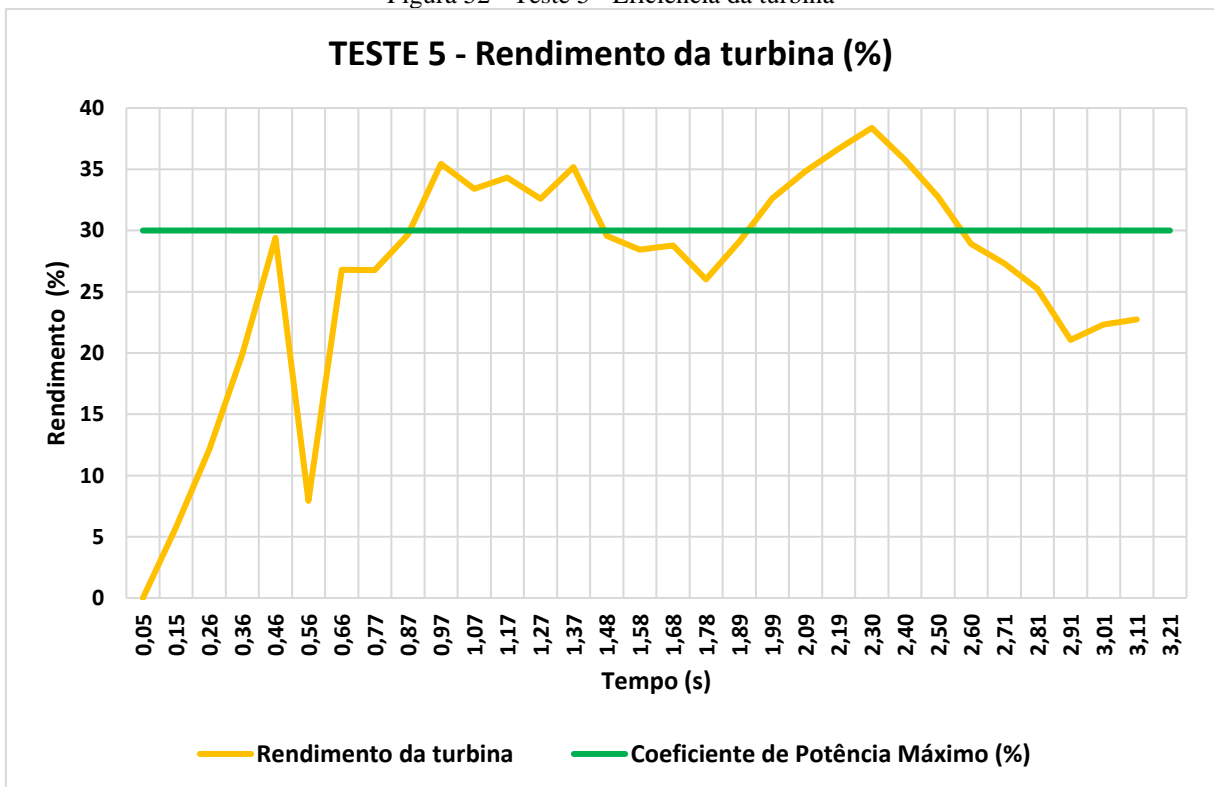
Fonte: Autor (2024).

Figura 51 - Teste 5 - Potência disponível no vento x Potência da turina



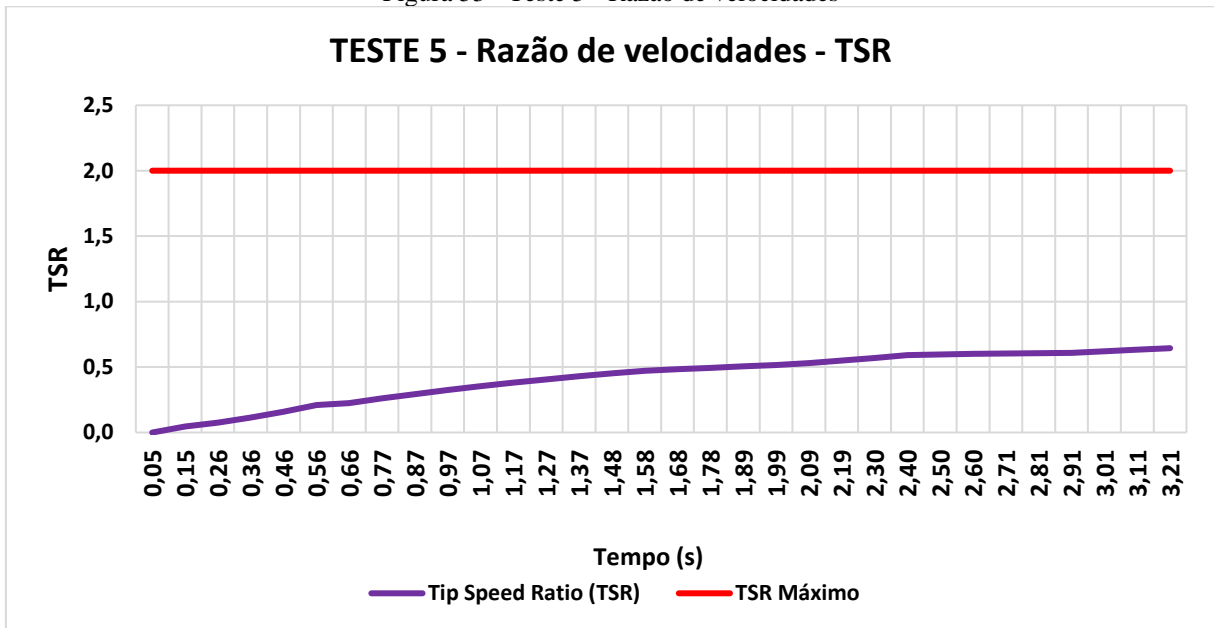
Fonte: Autor (2024).

Figura 52 - Teste 5 - Eficiência da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 53 - Teste 5 - Razão de velocidades



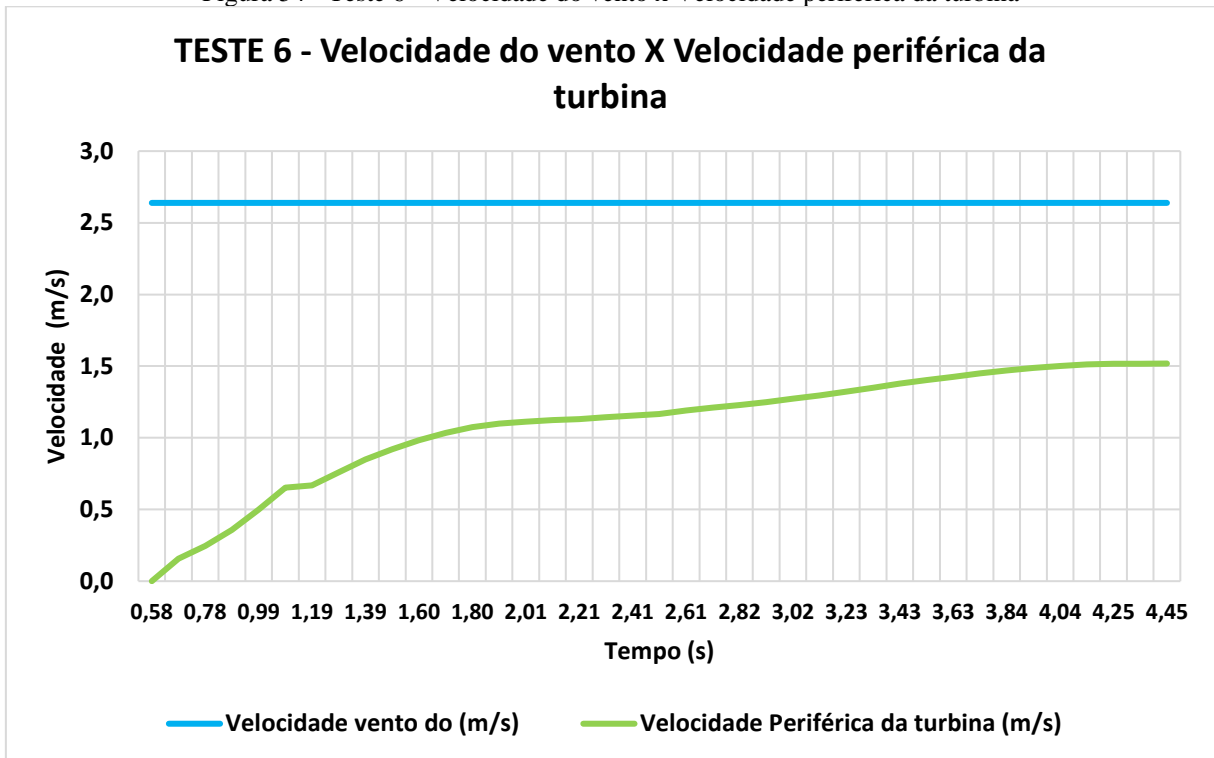
Fonte: Autor (2024).

Tabela 8 - Resultados teste 6

Tempo (s)	Rotação (Rpm)	Velocidade vento do (m/s)	Velocidade Periférica da turbina (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR) da Turbina	Potência disponível no vento (W)	Velocidade Angular (Rad/s)	Energia (J)	Variação de energia (J)	Variação do tempo (s)	Potência extraída pela turbina (W)	Rendimento da turbina	Porcentagem (%)
0,58	0,00	2,64	0,00	0,00	49,60	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
0,68	1,20	2,64	0,16	0,06	49,60	0,13	0,29	0,43	0,10	4,10	0,08	8,27
0,78	1,89	2,64	0,25	0,09	49,60	0,20	0,72	0,79	0,10	7,63	0,15	15,37
0,88	2,73	2,64	0,36	0,14	49,60	0,29	1,51	1,43	0,10	14,20	0,29	28,62
0,99	3,81	2,64	0,50	0,19	49,60	0,40	2,94	2,09	0,10	20,30	0,41	40,93
1,09	4,98	2,64	0,65	0,25	49,60	0,52	5,03	0,23	0,10	2,27	0,05	4,59
1,19	5,10	2,64	0,67	0,25	49,60	0,53	5,26	1,57	0,10	15,42	0,31	31,09
1,29	5,81	2,64	0,76	0,29	49,60	0,61	6,84	1,70	0,10	16,81	0,34	33,90
1,39	6,49	2,64	0,85	0,32	49,60	0,68	8,53	1,47	0,10	14,30	0,29	28,82
1,50	7,03	2,64	0,92	0,35	49,60	0,74	10,01	1,43	0,10	14,14	0,28	28,50
1,60	7,52	2,64	0,98	0,37	49,60	0,79	11,43	1,23	0,10	12,06	0,24	24,31
1,70	7,91	2,64	1,04	0,39	49,60	0,83	12,66	0,96	0,10	9,45	0,19	19,05
1,80	8,20	2,64	1,07	0,41	49,60	0,86	13,63	0,66	0,10	6,49	0,13	13,09
1,90	8,40	2,64	1,10	0,42	49,60	0,88	14,29	0,34	0,10	3,30	0,07	6,66
2,01	8,50	2,64	1,11	0,42	49,60	0,89	14,63	0,26	0,10	2,54	0,05	5,13
2,11	8,58	2,64	1,12	0,43	49,60	0,90	14,89	0,18	0,10	1,83	0,04	3,69
2,21	8,63	2,64	1,13	0,43	49,60	0,90	15,07	0,37	0,10	3,69	0,07	7,44
2,31	8,73	2,64	1,14	0,43	49,60	0,91	15,45	0,30	0,10	2,93	0,06	5,91
2,41	8,82	2,64	1,15	0,44	49,60	0,92	15,74	0,35	0,10	3,50	0,07	7,06
2,51	8,92	2,64	1,17	0,44	49,60	0,93	16,10	0,64	0,10	6,23	0,13	12,56
2,61	9,09	2,64	1,19	0,45	49,60	0,95	16,73	0,56	0,10	5,46	0,11	11,01
2,72	9,24	2,64	1,21	0,46	49,60	0,97	17,29	0,51	0,10	5,09	0,10	10,26
2,82	9,38	2,64	1,23	0,47	49,60	0,98	17,81	0,61	0,10	5,97	0,12	12,04
2,92	9,54	2,64	1,25	0,47	49,60	1,00	18,42	0,77	0,10	7,61	0,15	15,34
3,02	9,73	2,64	1,27	0,48	49,60	1,02	19,19	0,66	0,10	6,50	0,13	13,10
3,12	9,90	2,64	1,30	0,49	49,60	1,04	19,85	0,80	0,10	7,82	0,16	15,76
3,23	10,10	2,64	1,32	0,50	49,60	1,06	20,65	0,88	0,10	8,68	0,17	17,49
3,33	10,31	2,64	1,35	0,51	49,60	1,08	21,52	0,93	0,10	9,00	0,18	18,14
3,43	10,53	2,64	1,38	0,52	49,60	1,10	22,45	0,81	0,10	7,99	0,16	16,10
3,53	10,72	2,64	1,40	0,53	49,60	1,12	23,26	0,76	0,10	7,48	0,15	15,07
3,63	10,89	2,64	1,43	0,54	49,60	1,14	24,03	0,81	0,10	7,93	0,16	15,98
3,74	11,08	2,64	1,45	0,55	49,60	1,16	24,84	0,68	0,10	6,64	0,13	13,39
3,84	11,23	2,64	1,47	0,56	49,60	1,18	25,52	0,59	0,10	5,72	0,12	11,53
3,94	11,36	2,64	1,49	0,56	49,60	1,19	26,11	0,49	0,10	4,85	0,10	9,78
4,04	11,46	2,64	1,50	0,57	49,60	1,20	26,60	0,42	0,10	4,11	0,08	8,29
4,14	11,55	2,64	1,51	0,57	49,60	1,21	27,02	0,14	0,10	1,39	0,03	2,81
4,25	11,58	2,64	1,52	0,57	49,60	1,21	27,16	0,04	0,10	0,35	0,01	0,70
4,35	11,59	2,64	1,52	0,57	49,60	1,21	27,20	0,04	0,10	0,35	0,01	0,70
4,45	11,60	2,64	1,52	0,58	49,60	1,21	27,24					

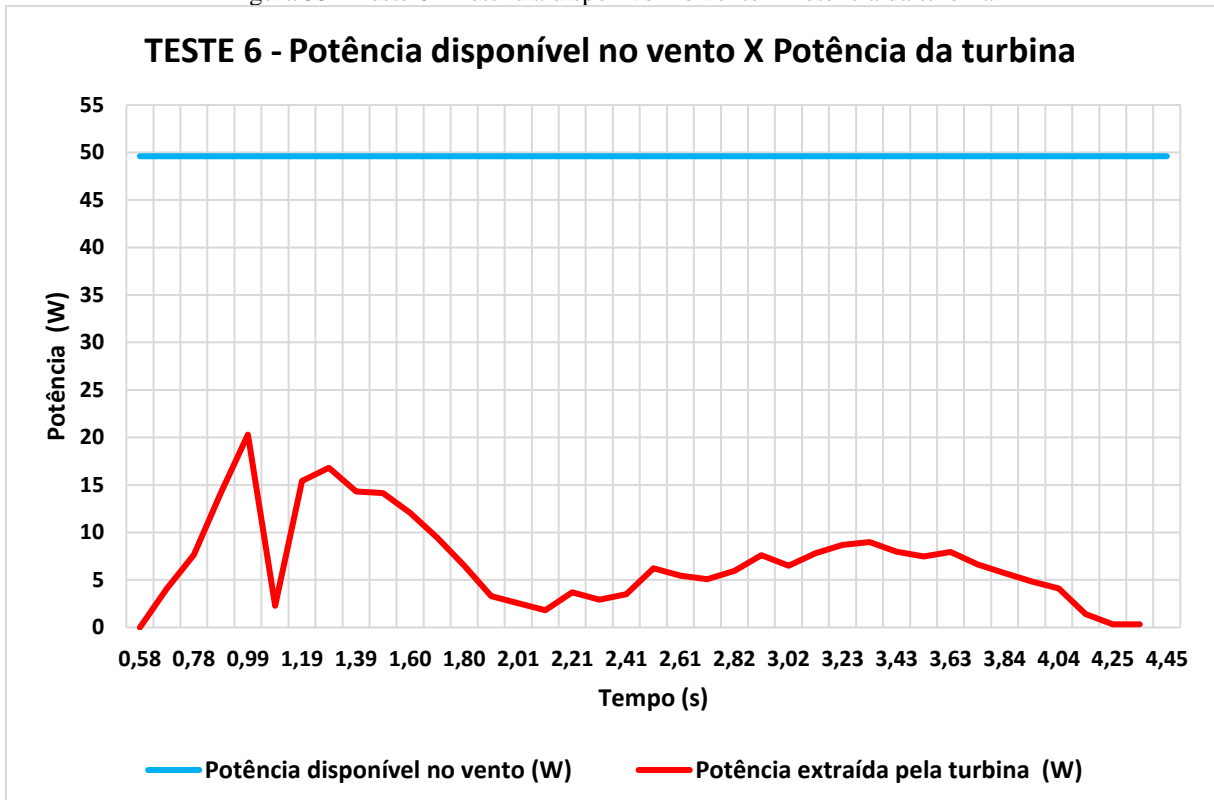
Fonte: Autor (2024).

Figura 54 - Teste 6 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina



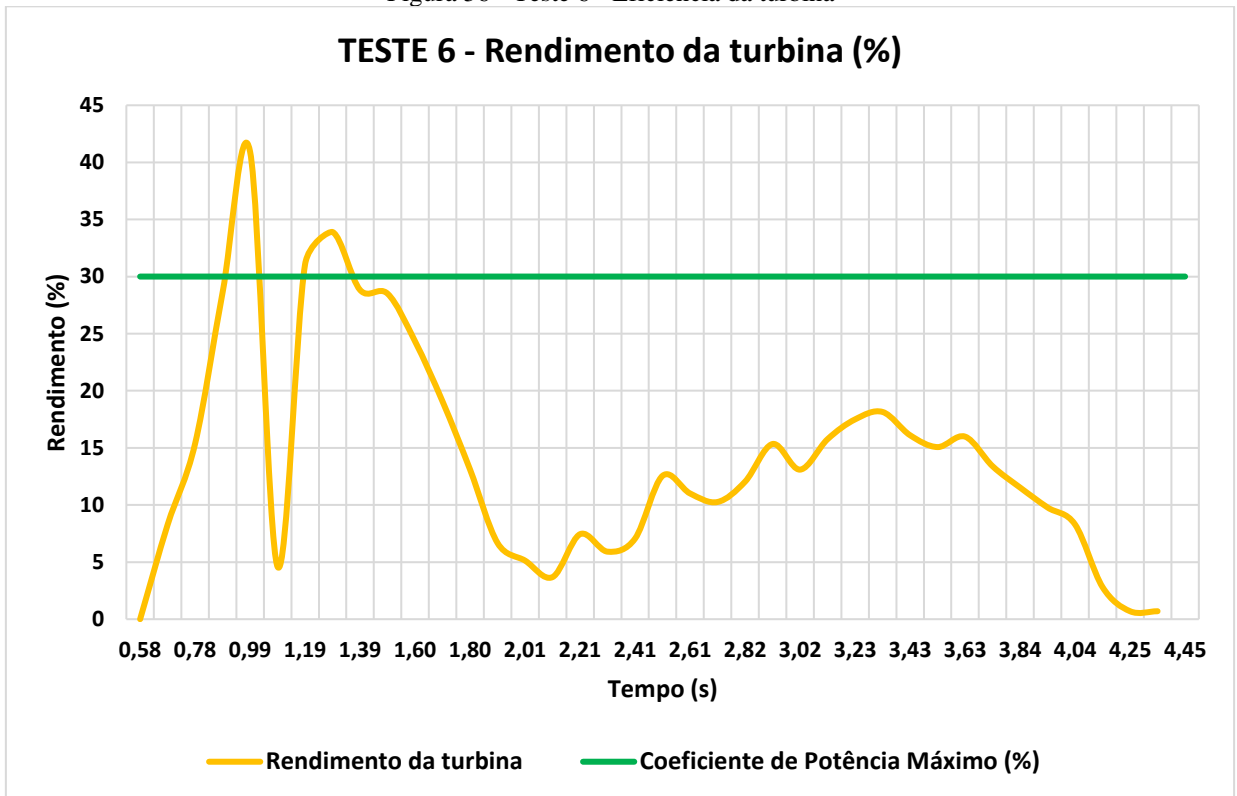
Fonte: Autor (2024).

Figura 55 - Teste 6 - Potência disponível no vento x Potência da turbina



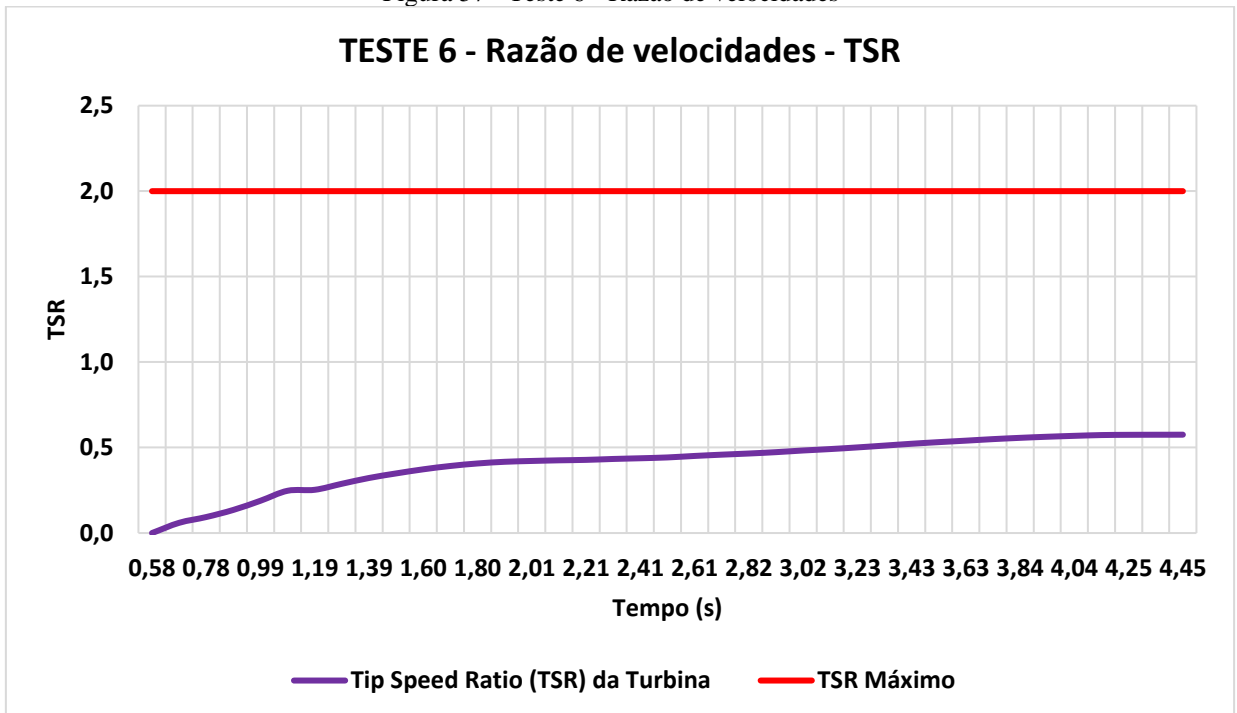
Fonte: Autor (2024).

Figura 56 - Teste 6 - Eficiência da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 57 - Teste 6 - Razão de velocidades



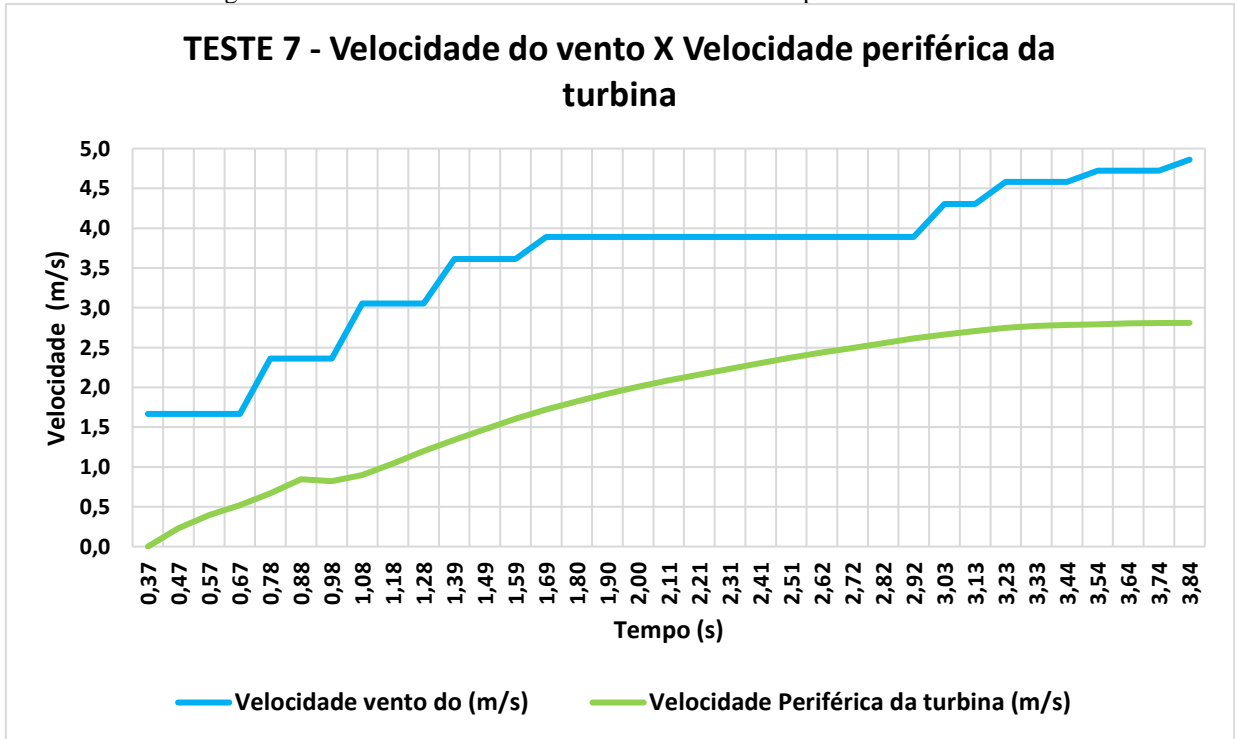
Fonte: Autor (2024).

Tabela 9 - Resultados teste 7

Tempo (s)	Rotação (Rpm)	Velocidade vento do (m/s)	Velocidade Periférica da turbina (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR)	Potência disponível no vento (W)	Velocidade Angular (Rad/s)	Energia (J)	Varição de energia (J)	Varição do tempo (s)	Potência extraída pela turbina (W)	Rendimento da turbina	Porcentagem (%)
0,37	0,00	1,67	0,00	0,00	12,50	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
0,47	1,77	1,67	0,23	0,14	12,50	0,19	0,64	1,22	0,10	11,87	0,95	95,01
0,57	3,03	1,67	0,40	0,24	12,50	0,32	1,86	1,34	0,10	13,17	1,05	105,40
0,67	3,98	1,67	0,52	0,31	12,50	0,42	3,20	2,06	0,10	20,40	1,63	163,23
0,78	5,10	2,36	0,67	0,28	35,53	0,53	5,26	3,17	0,10	31,40	0,88	88,39
0,88	6,45	2,36	0,84	0,36	35,53	0,68	8,43	-0,45	0,10	-4,45	-0,13	-12,52
0,98	6,28	2,36	0,82	0,35	35,53	0,66	7,99	1,51	0,10	14,66	0,41	41,27
1,08	6,85	3,06	0,90	0,29	77,00	0,72	9,50	3,31	0,10	32,50	0,42	42,20
1,18	7,95	3,06	1,04	0,34	77,00	0,83	12,81	4,15	0,10	40,64	0,53	52,78
1,28	9,15	3,06	1,20	0,39	77,00	0,96	16,96	4,31	0,10	41,89	0,54	54,40
1,39	10,25	3,61	1,34	0,37	127,11	1,07	21,27	4,42	0,10	43,35	0,34	34,11
1,49	11,27	3,61	1,47	0,41	127,11	1,18	25,69	4,84	0,10	47,44	0,37	37,33
1,59	12,28	3,61	1,61	0,45	127,11	1,29	30,53	4,61	0,10	45,17	0,36	35,53
1,69	13,17	3,89	1,72	0,44	158,75	1,38	35,14	4,11	0,10	39,95	0,25	25,16
1,80	13,92	3,89	1,82	0,47	158,75	1,46	39,25	4,25	0,10	41,29	0,26	26,01
1,90	14,66	3,89	1,92	0,49	158,75	1,54	43,51	4,19	0,10	40,66	0,26	25,61
2,00	15,35	3,89	2,01	0,52	158,75	1,61	47,69	3,79	0,10	36,82	0,23	23,19
2,11	15,95	3,89	2,09	0,54	158,75	1,67	51,49	3,78	0,10	37,47	0,24	23,61
2,21	16,52	3,89	2,16	0,56	158,75	1,73	55,27	3,66	0,10	35,16	0,22	22,15
2,31	17,06	3,89	2,23	0,57	158,75	1,79	58,93	3,88	0,10	37,69	0,24	23,74
2,41	17,61	3,89	2,31	0,59	158,75	1,84	62,81	3,84	0,10	38,01	0,24	23,94
2,51	18,14	3,89	2,38	0,61	158,75	1,90	66,65	3,50	0,10	33,94	0,21	21,38
2,62	18,61	3,89	2,44	0,63	158,75	1,95	70,14	3,47	0,10	34,33	0,22	21,63
2,72	19,07	3,89	2,50	0,64	158,75	2,00	73,61	3,55	0,10	34,48	0,22	21,72
2,82	19,52	3,89	2,56	0,66	158,75	2,04	77,16	3,57	0,10	35,04	0,22	22,07
2,92	19,97	3,89	2,61	0,67	158,75	2,09	80,74	3,15	0,10	30,93	0,19	19,48
3,03	20,36	4,31	2,66	0,62	215,44	2,13	83,89	2,83	0,10	27,78	0,13	12,89
3,13	20,70	4,31	2,71	0,63	215,44	2,17	86,73	2,43	0,10	24,05	0,11	11,16
3,23	20,98	4,58	2,75	0,60	259,89	2,20	89,15	1,62	0,10	15,40	0,06	5,92
3,33	21,17	4,58	2,77	0,60	259,89	2,22	90,77	0,78	0,10	7,66	0,03	2,95
3,44	21,27	4,58	2,78	0,61	259,89	2,23	91,55	0,59	0,10	5,71	0,02	2,20
3,54	21,33	4,72	2,79	0,59	284,24	2,23	92,14	0,66	0,10	6,43	0,02	2,26
3,64	21,41	4,72	2,80	0,59	284,24	2,24	92,80	0,26	0,10	2,58	0,01	0,91
3,74	21,44	4,72	2,81	0,59	284,24	2,25	93,06	0,26	0,10	2,61	0,01	0,92
3,84	21,47	4,86	2,81	0,58	310,06	2,25	93,32					

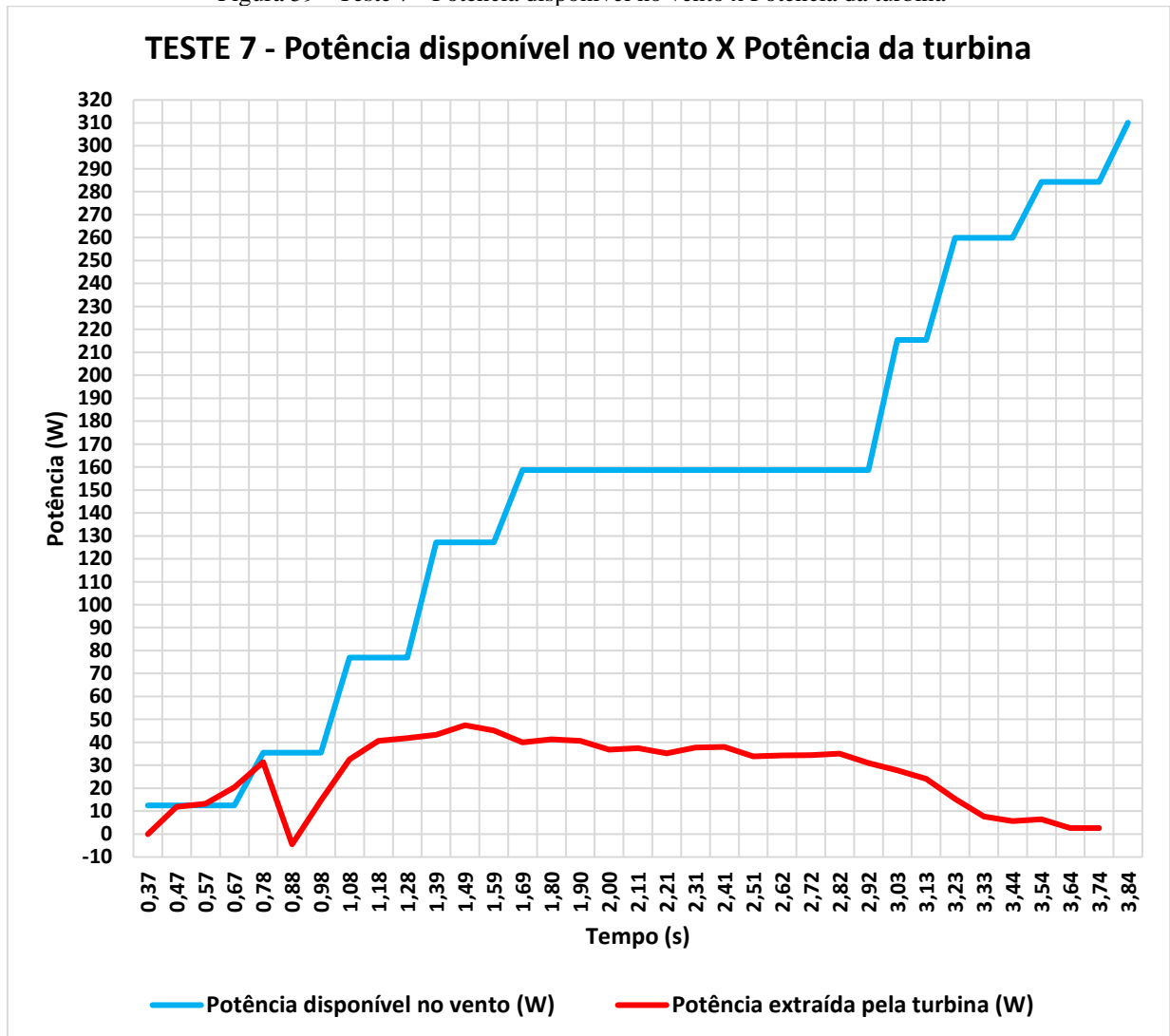
Fonte: Autor (2024).

Figura 58 - Teste 7 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina



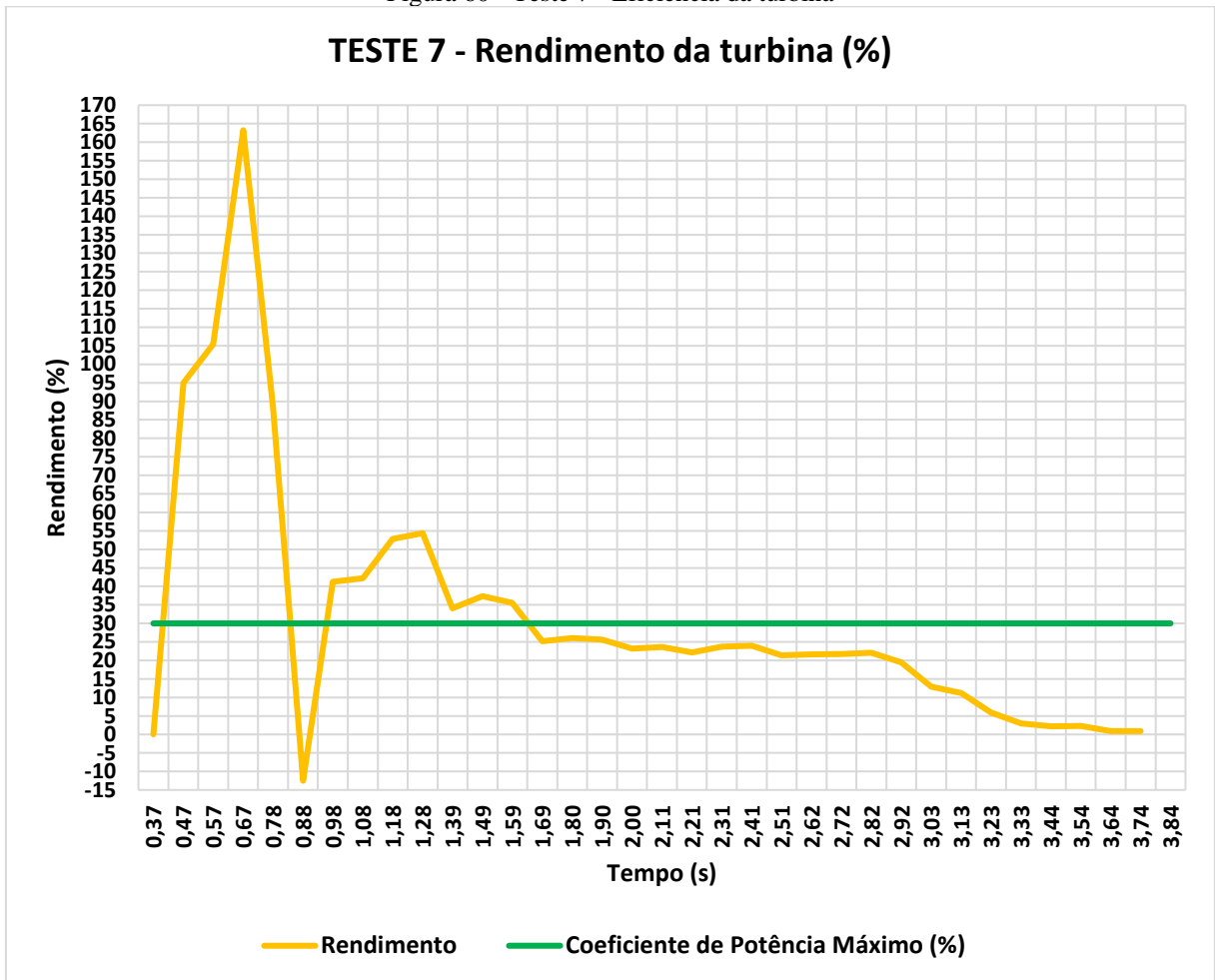
Fonte: Autor (2024).

Figura 59 - Teste 7 - Potência disponível no vento x Potência da turbina



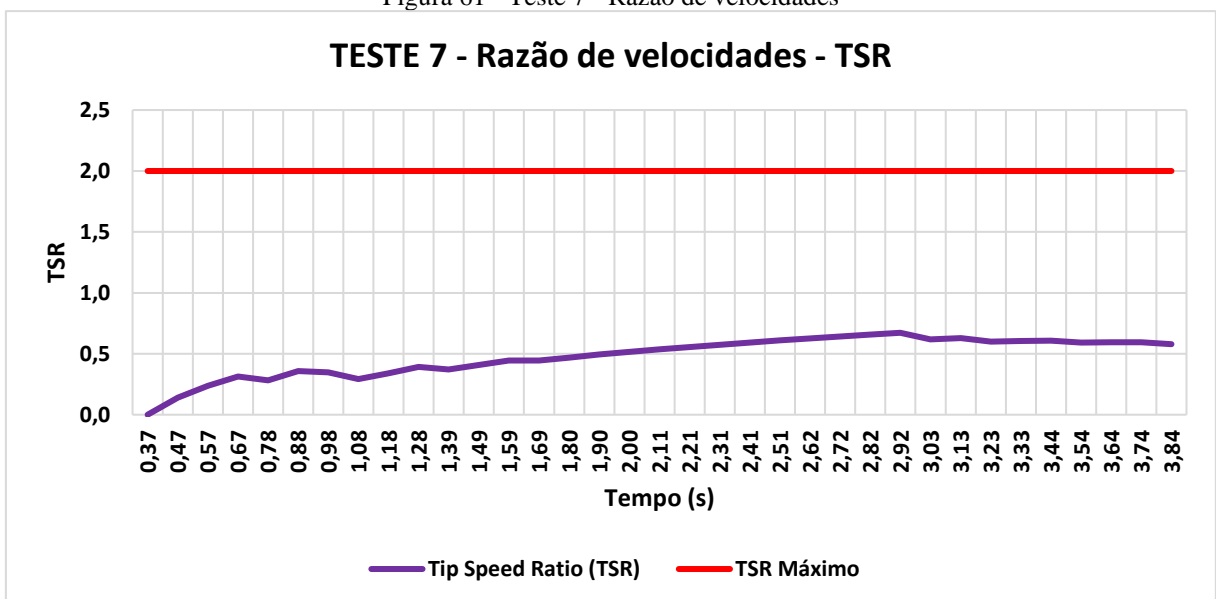
Fonte: Autor (2024).

Figura 60 - Teste 7 - Eficiência da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 61 - Teste 7 - Razão de velocidades



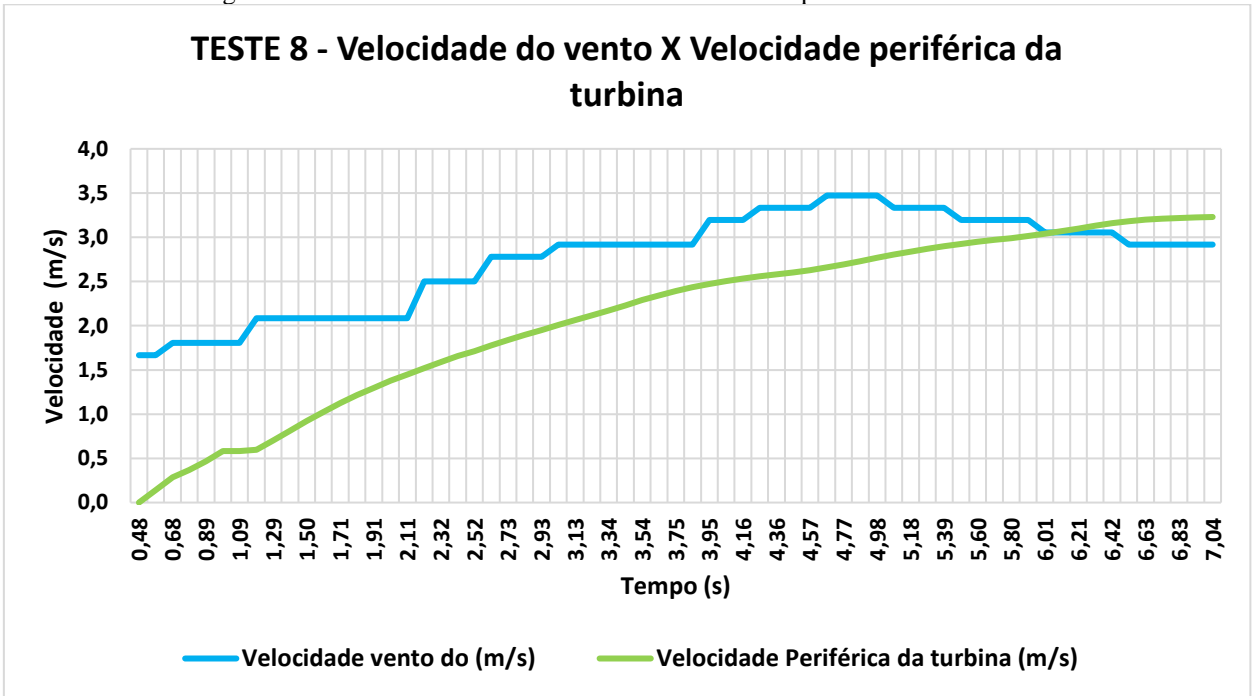
Fonte: Autor (2024).

Tabela 10 - Resultados teste 8

Tempo (s)	Rotação (Rpm)	Velocidade vento do (m/s)	Velocidade Periférica da turbina (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR)	Potência disponível no vento (W)	Velocidade Angular (Rad/s)	Energia (J)	Varição de energia (J)	Varição do tempo (s)	Potência extraída pela turbina (W)	Rendimento da turbina	Porcentagem (%)
0,48	0	1,67	0,00	0,00	12,50	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
0,58	1,09	1,67	0,14	0,09	12,50	0,11	0,24	0,72	0,10	7,14	0,57	57,17
0,68	2,18	1,81	0,29	0,16	15,89	0,23	0,96	0,64	0,10	6,30	0,40	39,66
0,79	2,81	1,81	0,37	0,20	15,89	0,29	1,60	0,98	0,10	9,72	0,61	61,17
0,89	3,57	1,81	0,47	0,26	15,89	0,37	2,58	1,43	0,10	14,15	0,89	89,04
0,99	4,45	1,81	0,58	0,32	15,89	0,47	4,01	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
1,09	4,45	1,81	0,58	0,32	15,89	0,47	4,01	0,20	0,10	1,99	0,13	12,50
1,19	4,56	2,08	0,60	0,29	24,41	0,48	4,21	1,61	0,10	15,60	0,64	63,91
1,29	5,36	2,08	0,70	0,34	24,41	0,56	5,82	1,92	0,10	18,60	0,76	76,21
1,40	6,18	2,08	0,81	0,39	24,41	0,65	7,73	2,30	0,10	22,35	0,92	91,56
1,50	7,04	2,08	0,92	0,44	24,41	0,74	10,03	2,31	0,10	22,48	0,92	92,09
1,60	7,81	2,08	1,02	0,49	24,41	0,82	12,35	2,59	0,10	25,14	1,03	103,02
1,71	8,59	2,08	1,12	0,54	24,41	0,90	14,94	2,50	0,10	24,47	1,00	100,27
1,81	9,28	2,08	1,21	0,58	24,41	0,97	17,44	2,41	0,10	23,60	0,97	96,71
1,91	9,9	2,08	1,30	0,62	24,41	1,04	19,84	2,56	0,10	25,13	1,03	102,96
2,01	10,52	2,08	1,38	0,66	24,41	1,10	22,41	2,40	0,10	23,57	0,97	96,57
2,11	11,07	2,08	1,45	0,70	24,41	1,16	24,81	2,53	0,10	24,29	1,00	99,54
2,22	11,62	2,50	1,52	0,61	42,18	1,22	27,34	2,55	0,10	25,01	0,59	59,29
2,32	12,15	2,50	1,59	0,64	42,18	1,27	29,89	2,51	0,10	24,61	0,58	58,36
2,42	12,65	2,50	1,66	0,66	42,18	1,32	32,40	2,29	0,10	22,26	0,53	52,78
2,52	13,09	2,50	1,71	0,69	42,18	1,37	34,69	2,59	0,10	25,40	0,60	60,22
2,63	13,57	2,78	1,78	0,64	57,85	1,42	37,28	2,63	0,10	26,01	0,45	44,96
2,73	14,04	2,78	1,84	0,66	57,85	1,47	39,91	2,54	0,10	24,91	0,43	43,05
2,83	14,48	2,78	1,90	0,68	57,85	1,52	42,45	2,56	0,10	25,33	0,44	43,79
2,93	14,91	2,78	1,95	0,70	57,85	1,56	45,01	2,63	0,10	25,82	0,45	44,63
3,03	15,34	2,92	2,01	0,69	66,97	1,61	47,64	2,58	0,10	25,55	0,38	38,15
3,13	15,75	2,92	2,06	0,71	66,97	1,65	50,22	2,71	0,10	26,35	0,39	39,35
3,24	16,17	2,92	2,12	0,73	66,97	1,69	52,94	2,85	0,10	27,70	0,41	41,36
3,34	16,6	2,92	2,17	0,75	66,97	1,74	55,79	3,00	0,10	29,09	0,43	43,44
3,44	17,04	2,92	2,23	0,76	66,97	1,78	58,79	3,15	0,10	30,54	0,46	45,60
3,54	17,49	2,92	2,29	0,78	66,97	1,83	61,93	2,94	0,10	28,80	0,43	43,00
3,65	17,9	2,92	2,34	0,80	66,97	1,87	64,87	2,71	0,10	26,31	0,39	39,28
3,75	18,27	2,92	2,39	0,82	66,97	1,91	67,58	2,46	0,10	23,92	0,36	35,71
3,85	18,6	2,92	2,43	0,83	66,97	1,95	70,04	2,20	0,10	21,79	0,33	32,54
3,95	18,89	3,19	2,47	0,77	87,99	1,98	72,24	1,92	0,10	18,87	0,21	21,45
4,06	19,14	3,19	2,51	0,78	87,99	2,00	74,17	1,56	0,10	15,28	0,17	17,36
4,16	19,34	3,19	2,53	0,79	87,99	2,03	75,73	1,65	0,10	16,05	0,18	18,24
4,26	19,55	3,33	2,56	0,77	99,97	2,05	77,38	1,27	0,10	12,35	0,12	12,35
4,36	19,71	3,33	2,58	0,77	99,97	2,06	78,65	1,44	0,10	14,15	0,14	14,15
4,47	19,89	3,33	2,60	0,78	99,97	2,08	80,09	1,54	0,10	15,07	0,15	15,08
4,57	20,08	3,33	2,63	0,79	99,97	2,10	81,63	1,88	0,10	18,44	0,18	18,44
4,67	20,31	3,47	2,66	0,77	113,00	2,13	83,51	2,15	0,10	21,10	0,19	18,67
4,77	20,57	3,47	2,69	0,78	113,00	2,15	85,66	2,43	0,10	23,85	0,21	21,10
4,87	20,86	3,47	2,73	0,79	113,00	2,18	88,10	2,47	0,10	23,95	0,21	21,19
4,98	21,15	3,47	2,77	0,80	113,00	2,21	90,56	2,41	0,11	22,99	0,20	20,34
5,08	21,43	3,33	2,81	0,84	99,97	2,24	92,98	2,18	0,10	21,39	0,21	21,40
5,18	21,68	3,33	2,84	0,85	99,97	2,27	95,16	2,12	0,10	20,57	0,21	20,57
5,29	21,92	3,33	2,87	0,86	99,97	2,30	97,28	1,96	0,10	19,24	0,19	19,25
5,39	22,14	3,33	2,90	0,87	99,97	2,32	99,24	1,71	0,10	16,61	0,17	16,61
5,49	22,33	3,19	2,92	0,92	87,99	2,34	100,95	1,73	0,10	16,59	0,19	18,85
5,60	22,52	3,19	2,95	0,92	87,99	2,36	102,68	1,65	0,10	16,00	0,18	18,18
5,70	22,7	3,19	2,97	0,93	87,99	2,38	104,32	1,38	0,11	13,17	0,15	14,97
5,80	22,85	3,19	2,99	0,94	87,99	2,39	105,71	1,58	0,10	15,63	0,18	17,76
5,90	23,02	3,19	3,01	0,94	87,99	2,41	107,29	1,97	0,10	19,28	0,22	21,91
6,01	23,23	3,06	3,04	1,00	77,00	2,43	109,25	2,08	0,10	19,99	0,26	25,96
6,11	23,45	3,06	3,07	1,00	77,00	2,46	111,33	2,19	0,10	21,52	0,28	27,94
6,21	23,68	3,06	3,10	1,01	77,00	2,48	113,53	2,31	0,10	22,46	0,29	29,16
6,32	23,92	3,06	3,13	1,02	77,00	2,50	115,84	2,04	0,10	19,64	0,26	25,51
6,42	24,13	3,06	3,16	1,03	77,00	2,53	117,88	1,67	0,10	16,34	0,21	21,22
6,52	24,3	2,92	3,18	1,09	66,97	2,54	119,55	1,28	0,10	12,45	0,19	18,59
6,63	24,43	2,92	3,20	1,10	66,97	2,56	120,83	0,99	0,10	9,72	0,15	14,51
6,73	24,53	2,92	3,21	1,10	66,97	2,57	121,82	0,60	0,10	5,74	0,09	8,57
6,83	24,59	2,92	3,22	1,10	66,97	2,58	122,42	0,50	0,10	4,79	0,07	7,15
6,93	24,64	2,92	3,23	1,11	66,97	2,58	122,92	0,30	0,10	2,94	0,04	4,38
7,04	24,67	2,92	3,23	1,11	66,97	2,58	123,22					

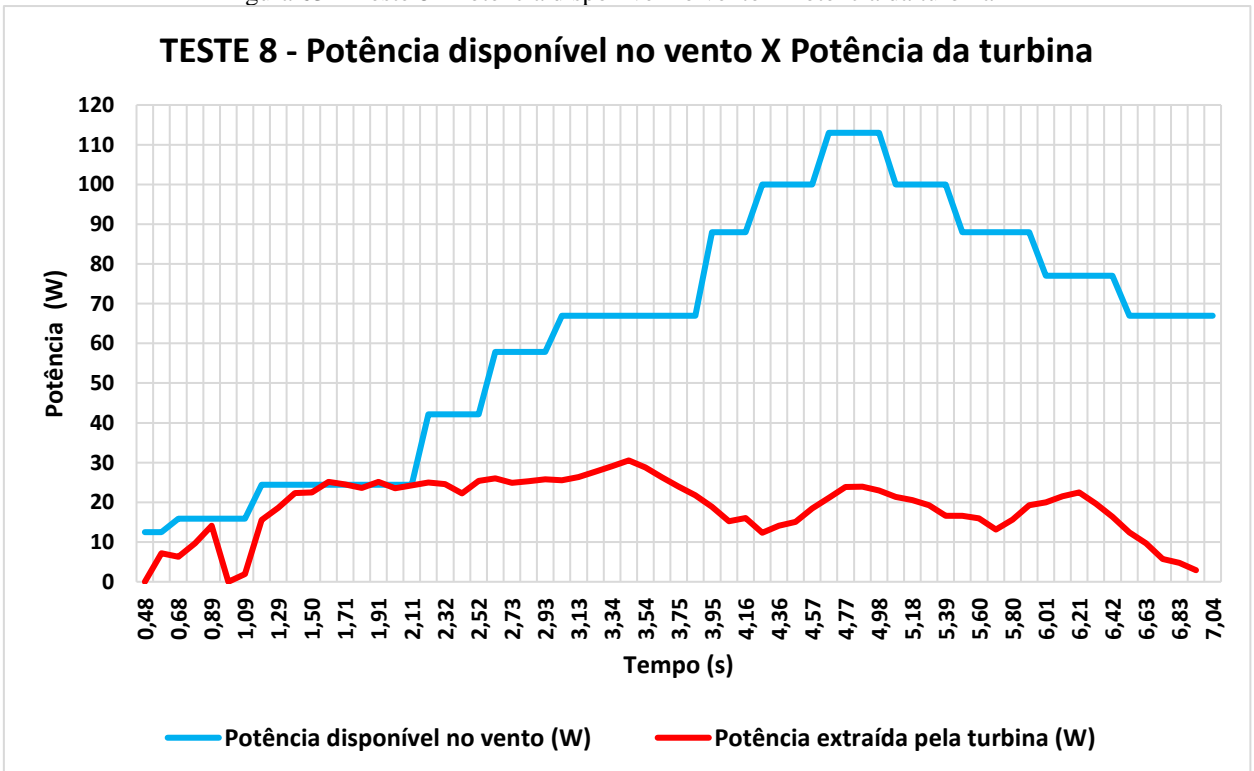
Fonte: Autor (2024).

Figura 62 - Teste 8 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 63 – Teste 8 - Potência disponível no vento x Potência da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 64 - Teste 8 - Eficiência da turbina

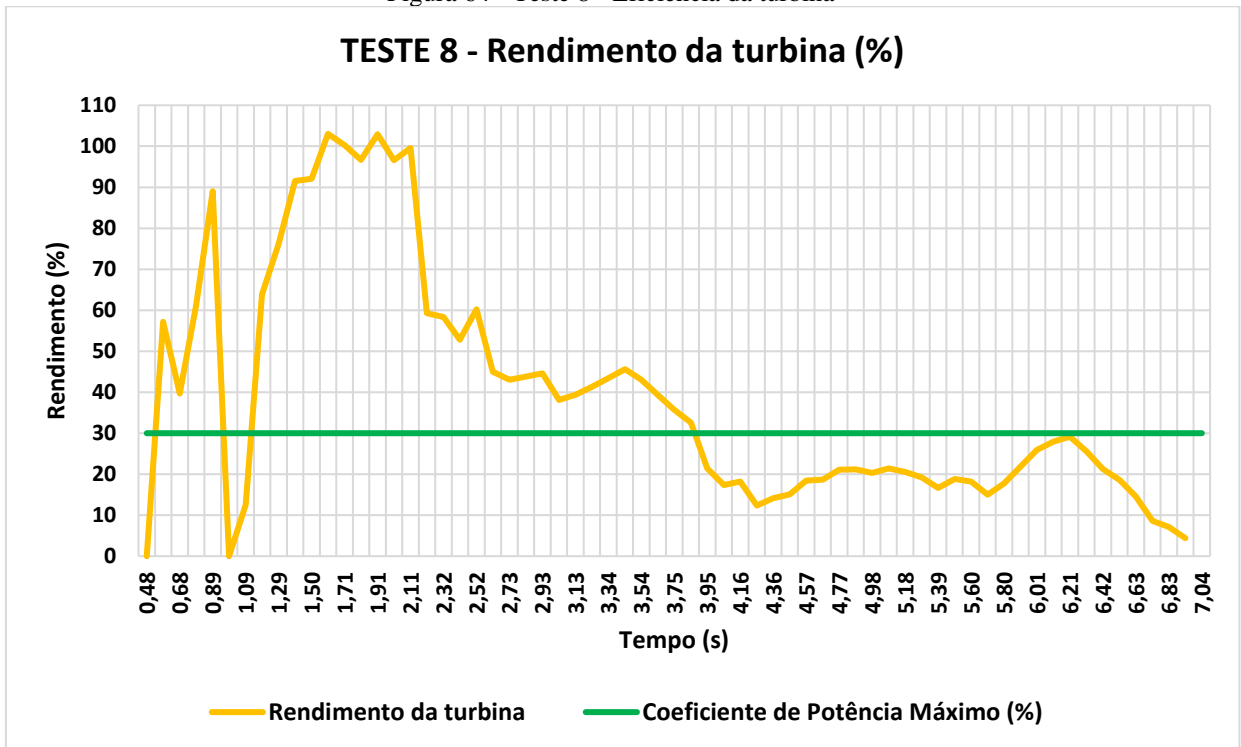


Figura 65 - Teste 8 - Razão de velocidades

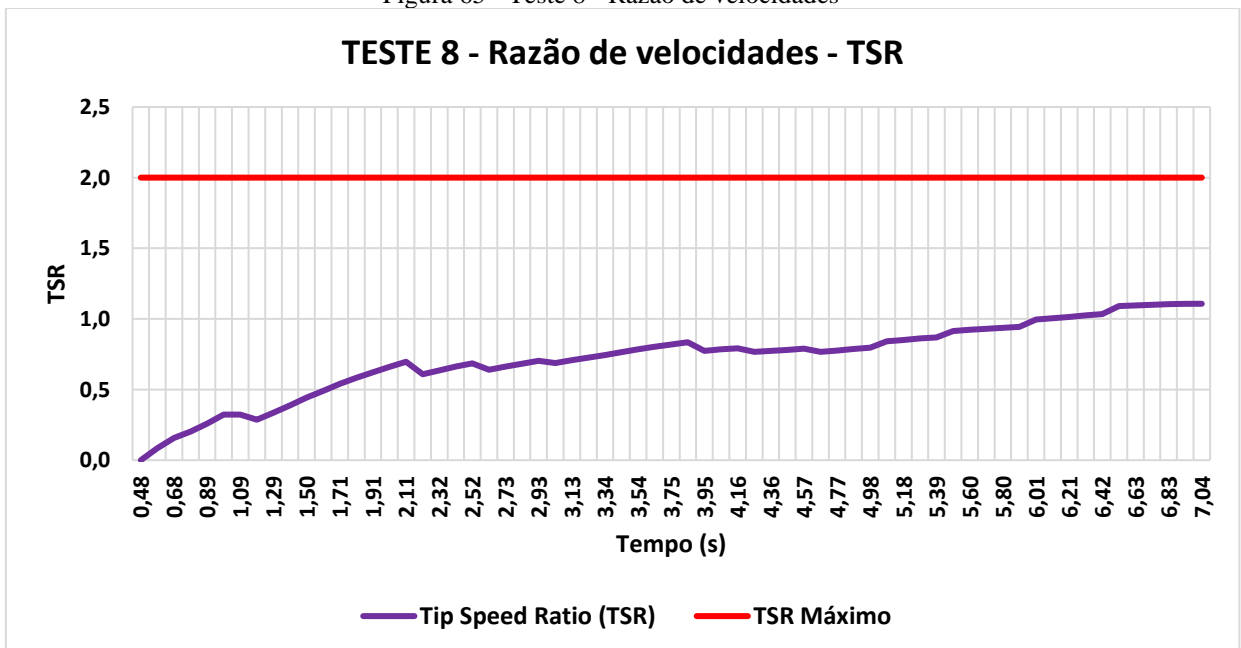
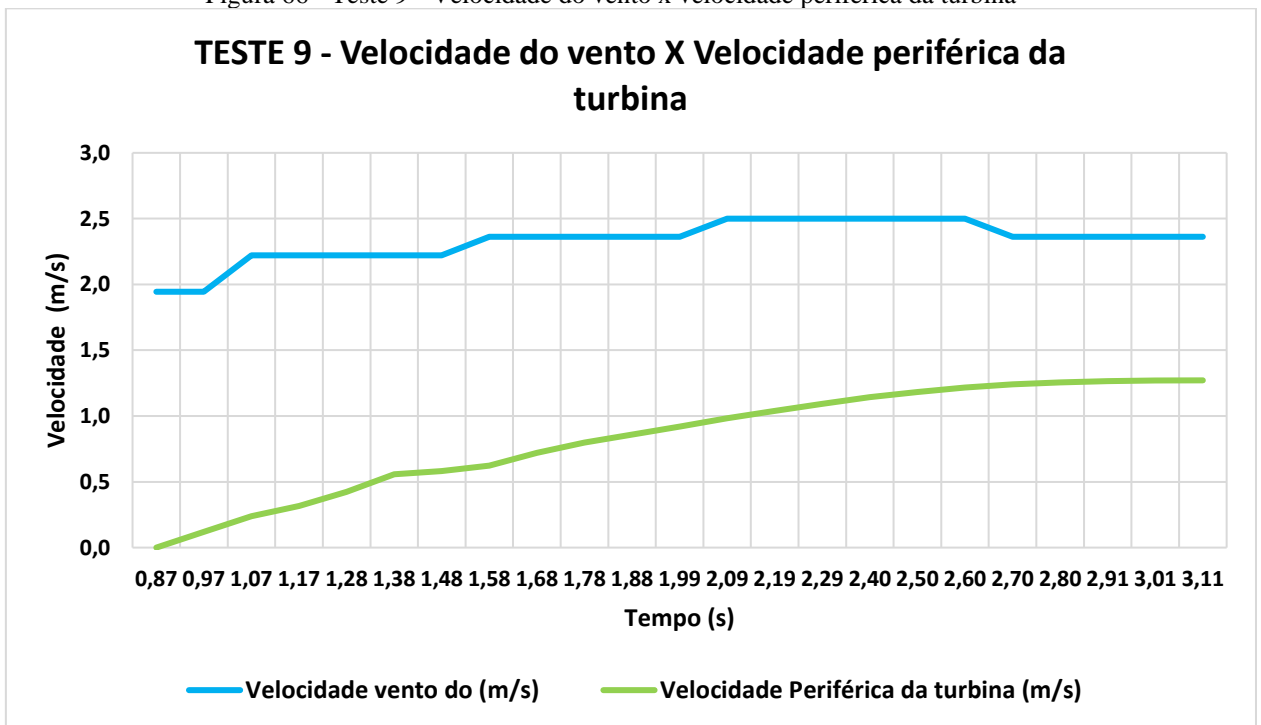


Tabela 11 - Resultados teste 9

Tempo (s)	Rotação (Rpm)	Velocidade vento do (m/s)	Velocidade Periférica da turbina (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR)	Potência disponível no vento (W)	Velocidade Angular (Rad/s)	Energia (J)	Varição de energia (J)	Varição do tempo (s)	Potência extraída pela turbina (W)	Rendimento da turbina	Porcentagem (%)
0,87	0	1,94	0,00	0,00	19,84	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
0,97	0,91	1,94	0,12	0,06	19,84	0,10	0,17	0,51	0,10	5,05	0,25	25,46
1,07	1,83	2,22	0,24	0,11	29,62	0,19	0,68	0,50	0,11	4,74	0,16	16,01
1,17	2,41	2,22	0,32	0,14	29,62	0,25	1,18	0,95	0,10	9,31	0,31	31,42
1,28	3,24	2,22	0,42	0,19	29,62	0,34	2,13	1,53	0,10	15,16	0,51	51,19
1,38	4,25	2,22	0,56	0,25	29,62	0,45	3,66	0,35	0,10	3,42	0,12	11,55
1,48	4,45	2,22	0,58	0,26	29,62	0,47	4,01	0,56	0,10	5,53	0,19	18,68
1,58	4,75	2,36	0,62	0,26	35,53	0,50	4,57	1,56	0,10	15,26	0,43	42,95
1,68	5,5	2,36	0,72	0,30	35,53	0,58	6,12	1,38	0,10	13,71	0,39	38,58
1,78	6,09	2,36	0,80	0,34	35,53	0,64	7,51	1,20	0,10	11,92	0,34	33,54
1,88	6,56	2,36	0,86	0,36	35,53	0,69	8,71	1,29	0,10	12,68	0,36	35,68
1,99	7,03	2,36	0,92	0,39	35,53	0,74	10,01	1,38	0,10	13,55	0,38	38,15
2,09	7,5	2,50	0,98	0,39	42,18	0,79	11,39	1,38	0,10	13,35	0,32	31,66
2,19	7,94	2,50	1,04	0,42	42,18	0,83	12,76	1,32	0,10	12,80	0,30	30,35
2,29	8,34	2,50	1,09	0,44	42,18	0,87	14,08	1,35	0,10	13,09	0,31	31,03
2,40	8,73	2,50	1,14	0,46	42,18	0,91	15,43	1,12	0,10	11,04	0,26	26,18
2,50	9,04	2,50	1,18	0,47	42,18	0,95	16,55	0,93	0,10	9,10	0,22	21,57
2,60	9,29	2,50	1,22	0,49	42,18	0,97	17,47	0,68	0,10	6,64	0,16	15,74
2,70	9,47	2,36	1,24	0,53	35,53	0,99	18,16	0,46	0,10	4,58	0,13	12,90
2,80	9,59	2,36	1,26	0,53	35,53	1,00	18,62	0,27	0,10	2,67	0,08	7,53
2,91	9,66	2,36	1,26	0,54	35,53	1,01	18,89	0,16	0,10	1,55	0,04	4,37
3,01	9,7	2,36	1,27	0,54	35,53	1,02	19,05	0,04	0,10	0,39	0,01	1,10
3,11	9,71	2,36	1,27	0,54	35,53	1,02	19,09					

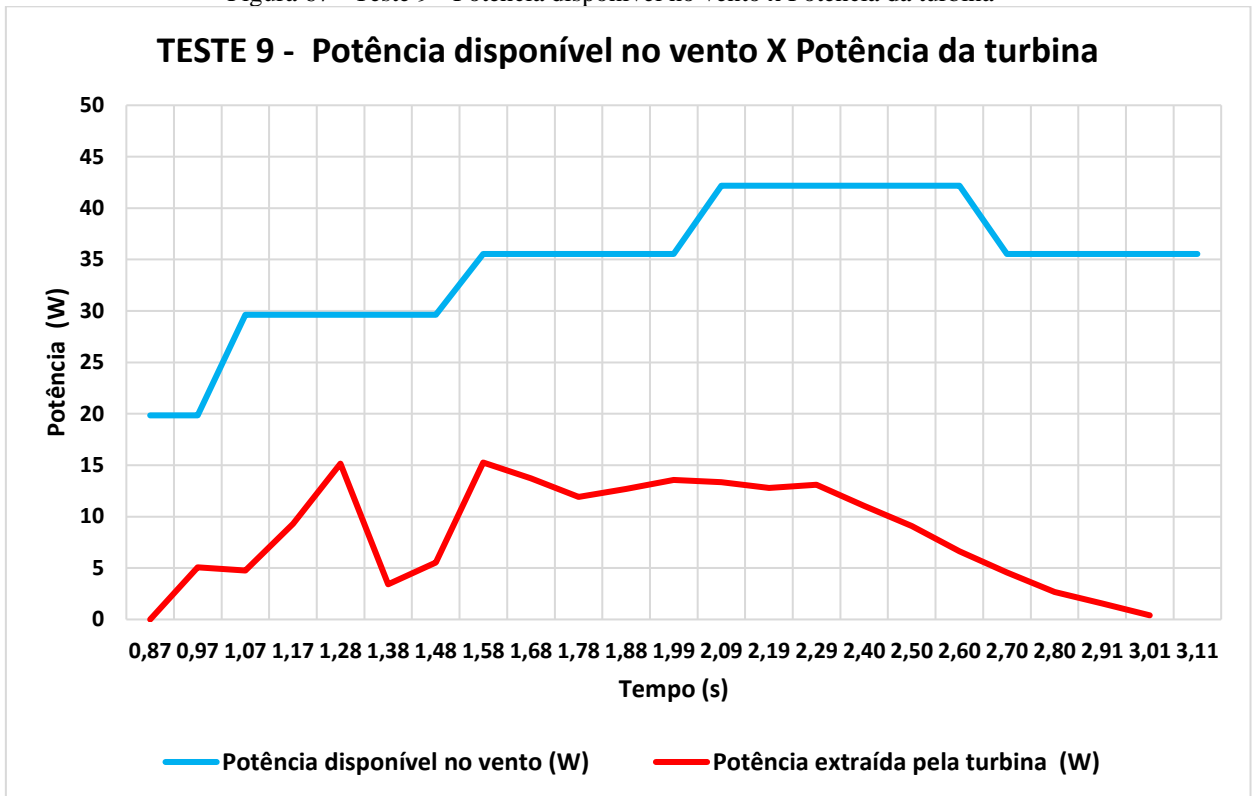
Fonte: Autor (2024).

Figura 66 - Teste 9 - Velocidade do vento x velocidade periférica da turbina



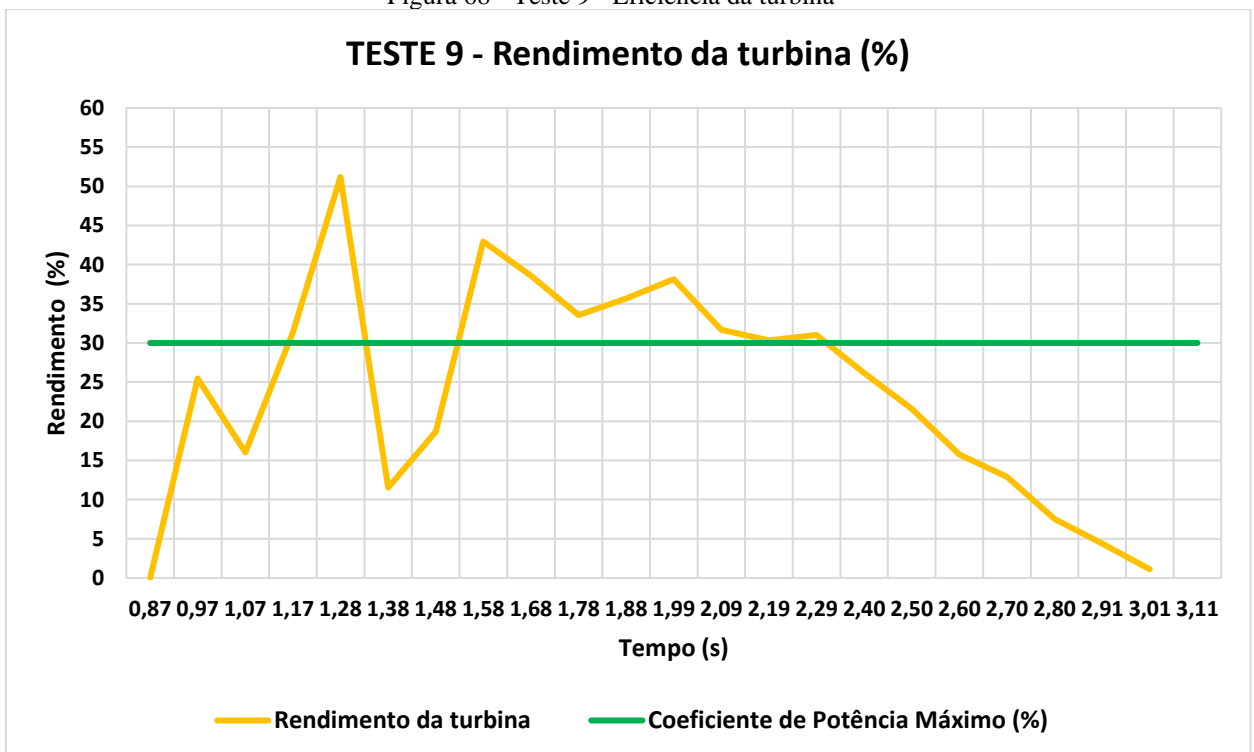
Fonte: Autor (2024).

Figura 67 - Teste 9 - Potência disponível no vento x Potência da turbina



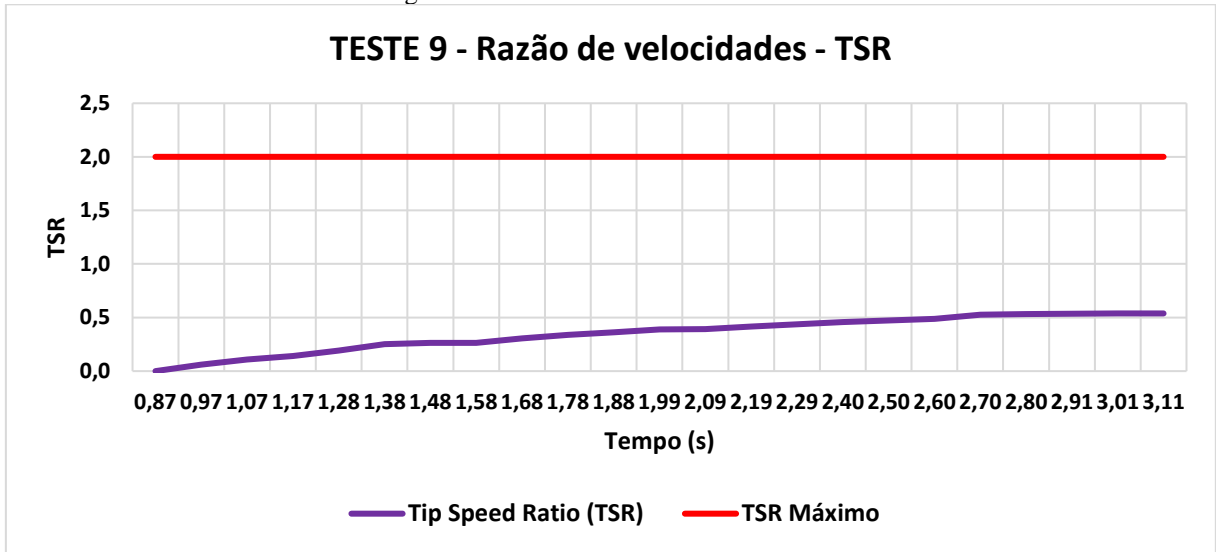
Fonte: Autor (2024).

Figura 68 - Teste 9 - Eficiência da turbina



Fonte: Autor (2024).

Figura 69 - Teste 9 - Razão de velocidades



Fonte: Autor (2024).

Tabela 12 - Resultados teste 10

Tempo (s)	Rotação (Rpm)	Velocidade vento do (m/s)	Velocidade Periférica da turbina (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR)	Potência disponível no vento (W)	Velocidade Angular (Rad/s)	Energia (J)	Variação de energia (J)	Variação do tempo (s)	Potência extraída pela turbina (W)	Rendimento da turbina	Porcentagem (%)
0,50	0	1,67	0,00	0,00	12,50	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
0,60	1,25	1,67	0,16	0,10	12,50	0,13	0,32	0,95	0,10	9,30	0,74	74,45
0,71	2,5	1,67	0,33	0,20	12,50	0,26	1,27	0,74	0,10	7,36	0,59	58,91
0,81	3,15	1,67	0,41	0,25	12,50	0,33	2,01	0,98	0,10	9,67	0,77	77,37
0,91	3,84	1,53	0,50	0,33	9,63	0,40	2,99	1,32	0,10	13,04	1,35	135,50
1,01	4,61	1,53	0,60	0,39	9,63	0,48	4,30	-0,78	0,10	-7,67	-0,80	-79,66
1,11	4,17	1,53	0,55	0,36	9,63	0,44	3,52	-0,61	0,10	-6,06	-0,63	-62,99
1,21	3,79	1,53	0,50	0,32	9,63	0,40	2,91	0,48	0,10	4,69	0,49	48,75
1,31	4,09	1,53	0,54	0,35	9,63	0,43	3,39	0,48	0,10	4,75	0,49	49,33
1,41	4,37	1,53	0,57	0,37	9,63	0,46	3,87	0,57	0,10	5,62	0,58	58,42
1,51	4,68	1,53	0,61	0,40	9,63	0,49	4,43	0,67	0,10	6,55	0,68	68,01
1,62	5,02	1,53	0,66	0,43	9,63	0,53	5,10	0,69	0,10	6,79	0,71	70,57
1,72	5,35	1,53	0,70	0,46	9,63	0,56	5,79	0,81	0,10	7,83	0,81	81,31
1,82	5,71	1,53	0,75	0,49	9,63	0,60	6,60	0,91	0,10	8,90	0,92	92,46
1,92	6,09	1,53	0,80	0,52	9,63	0,64	7,51	0,94	0,10	9,13	0,95	94,82
2,03	6,46	1,53	0,85	0,55	9,63	0,68	8,45	1,02	0,10	10,03	1,04	104,22
2,13	6,84	1,53	0,90	0,59	9,63	0,72	9,47	1,11	0,10	10,79	1,12	112,05
2,23	7,23	1,53	0,95	0,62	9,63	0,76	10,58	1,11	0,10	11,00	1,14	114,27
2,33	7,6	1,53	0,99	0,65	9,63	0,80	11,69	1,23	0,10	12,07	1,25	125,38
2,43	7,99	1,53	1,05	0,68	9,63	0,84	12,92	1,16	0,10	11,46	1,19	119,03
2,54	8,34	1,67	1,09	0,66	12,50	0,87	14,08	1,17	0,10	11,27	0,90	90,15
2,64	8,68	1,67	1,14	0,68	12,50	0,91	15,25	1,22	0,10	12,06	0,97	96,53
2,74	9,02	1,67	1,18	0,71	12,50	0,94	16,47	1,19	0,10	11,55	0,92	92,41
2,84	9,34	1,67	1,22	0,73	12,50	0,98	17,66	1,11	0,10	11,03	0,88	88,24
2,95	9,63	1,67	1,26	0,76	12,50	1,01	18,78	1,31	0,10	12,83	1,03	102,68
3,05	9,96	1,67	1,30	0,78	12,50	1,04	20,08	1,31	0,10	12,86	1,03	102,87
3,15	10,28	1,67	1,35	0,81	12,50	1,08	21,40	1,40	0,10	13,68	1,09	109,50
3,25	10,61	1,81	1,39	0,77	15,89	1,11	22,79	1,62	0,10	16,01	1,01	100,78
3,35	10,98	1,81	1,44	0,80	15,89	1,15	24,41	1,67	0,10	16,24	1,02	102,21
3,46	11,35	1,81	1,49	0,82	15,89	1,19	26,08	1,68	0,10	16,01	1,01	100,75
3,56	11,71	1,81	1,53	0,85	15,89	1,23	27,76	1,83	0,10	17,78	1,12	111,89
3,66	12,09	1,81	1,58	0,88	15,89	1,27	29,59	1,69	0,10	16,39	1,03	103,14
3,77	12,43	1,81	1,63	0,90	15,89	1,30	31,28	1,43	0,10	14,11	0,89	88,81
3,87	12,71	1,81	1,66	0,92	15,89	1,33	32,71	1,30	0,10	12,86	0,81	80,97
3,97	12,96	1,81	1,70	0,94	15,89	1,36	34,00	1,11	0,10	11,00	0,69	69,23
4,07	13,17	1,81	1,72	0,95	15,89	1,38	35,12	0,80	0,10	7,89	0,50	49,64
4,17	13,32	1,81	1,74	0,97	15,89	1,39	35,92	0,65	0,10	6,37	0,40	40,12
4,27	13,44	1,81	1,76	0,97	15,89	1,41	36,57	0,71	0,10	6,90	0,43	43,44
4,38	13,57	2,08	1,78	0,85	24,41	1,42	37,28	0,66	0,10	6,56	0,27	26,87
4,48	13,69	2,08	1,79	0,86	24,41	1,43	37,94	0,50	0,10	4,91	0,20	20,11
4,58	13,78	2,08	1,80	0,87	24,41	1,44	38,44	0,56	0,10	5,49	0,22	22,49
4,68	13,88	2,08	1,82	0,87	24,41	1,45	39,00	0,45	0,10	4,46	0,18	18,29
4,78	13,96	2,08	1,83	0,88	24,41	1,46	39,46	0,45	0,10	4,45	0,18	18,22
4,88	14,04	2,22	1,84	0,83	29,62	1,47	39,91	0,28	0,10	2,74	0,09	9,24
4,99	14,09	2,22	1,84	0,83	29,62	1,48	40,19	0,34	0,10	3,36	0,11	11,35
5,09	14,15	2,22	1,85	0,83	29,62	1,48	40,54	0,29	0,10	2,81	0,09	9,50
5,19	14,2	2,22	1,86	0,84	29,62	1,49	40,82	0,40	0,10	3,99	0,13	13,49
5,29	14,27	2,22	1,87	0,84	29,62	1,49	41,23	0,41	0,10	3,94	0,13	13,29
5,40	14,34	2,22	1,88	0,84	29,62	1,50	41,63	0,64	0,10	6,35	0,21	21,43
5,50	14,45	2,22	1,89	0,85	29,62	1,51	42,27	0,65	0,10	6,40	0,22	21,59
5,60	14,56	2,22	1,91	0,86	29,62	1,52	42,92	0,53	0,10	5,27	0,18	17,79
5,70	14,65	2,22	1,92	0,86	29,62	1,53	43,45	0,48	0,10	4,71	0,16	15,91
5,80	14,73	2,22	1,93	0,87	29,62	1,54	43,93	0,42	0,10	4,10	0,14	13,85
5,90	14,8	2,22	1,94	0,87	29,62	1,55	44,35	0,12	0,10	1,18	0,04	3,97
6,00	14,82	2,22	1,94	0,87	29,62	1,55	44,47	0,06	0,11	0,57	0,02	1,91
6,11	14,83	2,22	1,94	0,87	29,62	1,55	44,53					

Fonte: Autor (2024).

Figura 70 - Teste 10 - Velocidade do vento x Velocidade periférica da turbina

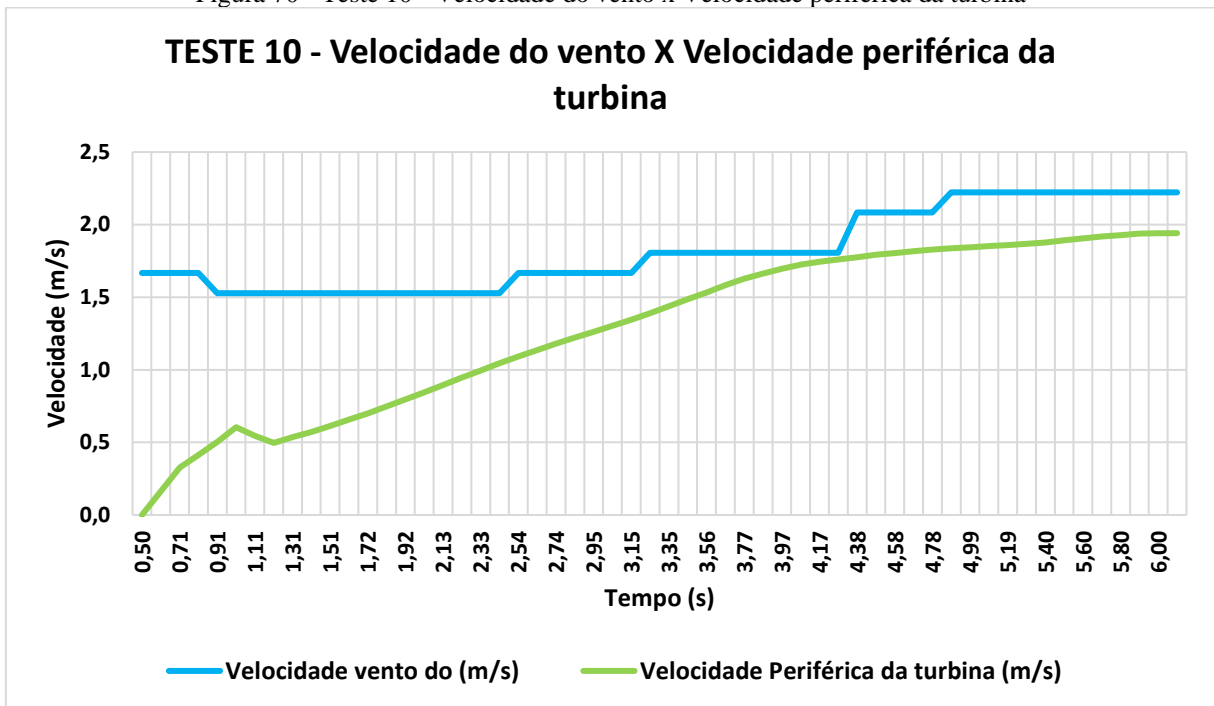


Figura 71 - Teste 10 - Potência disponível no vento x Potência da turbina

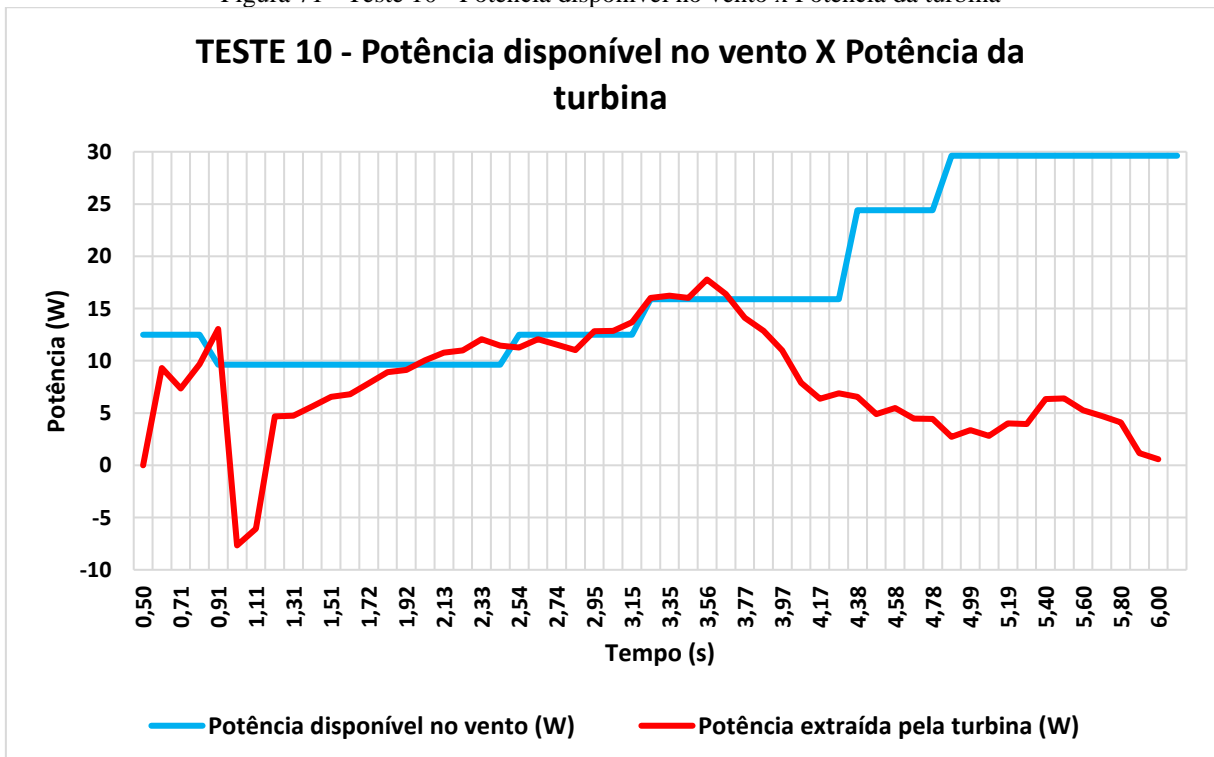
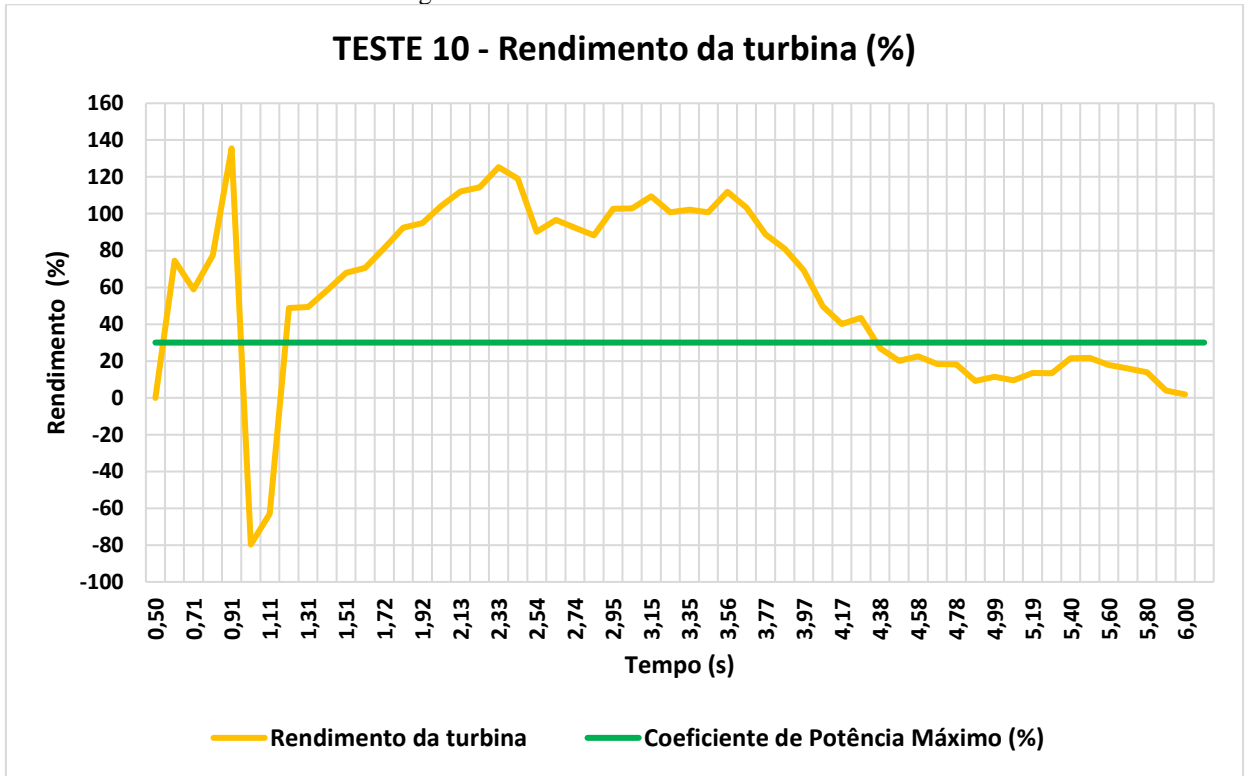
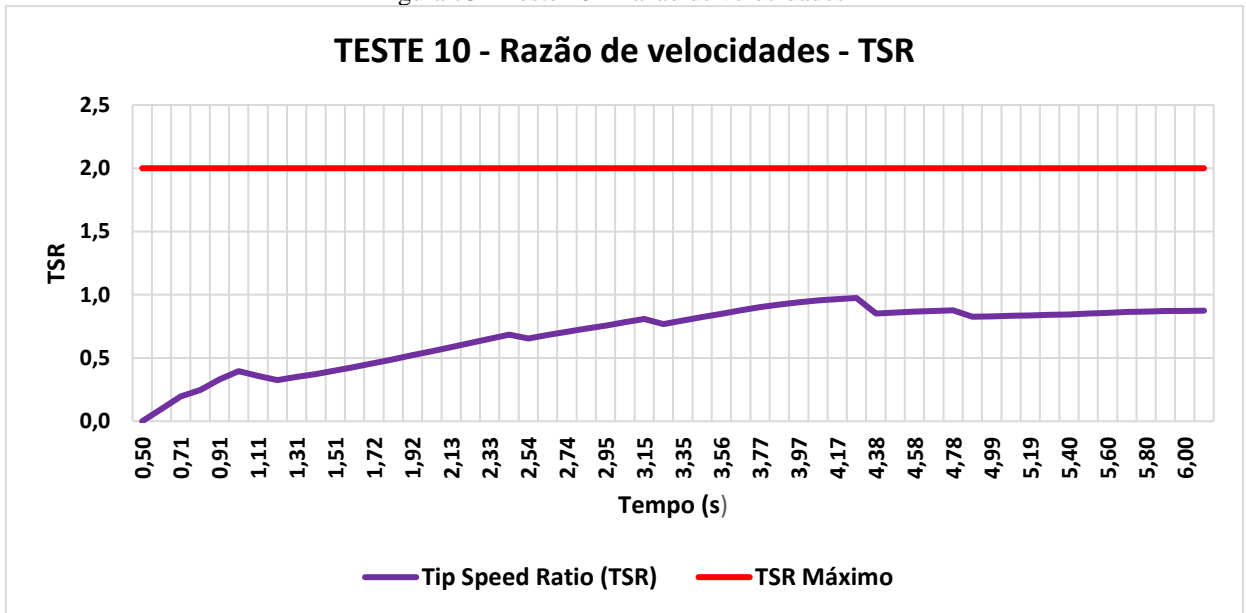


Figura 72 - Teste 10 - Eficiência turbina



Fonte: Autor (2024).

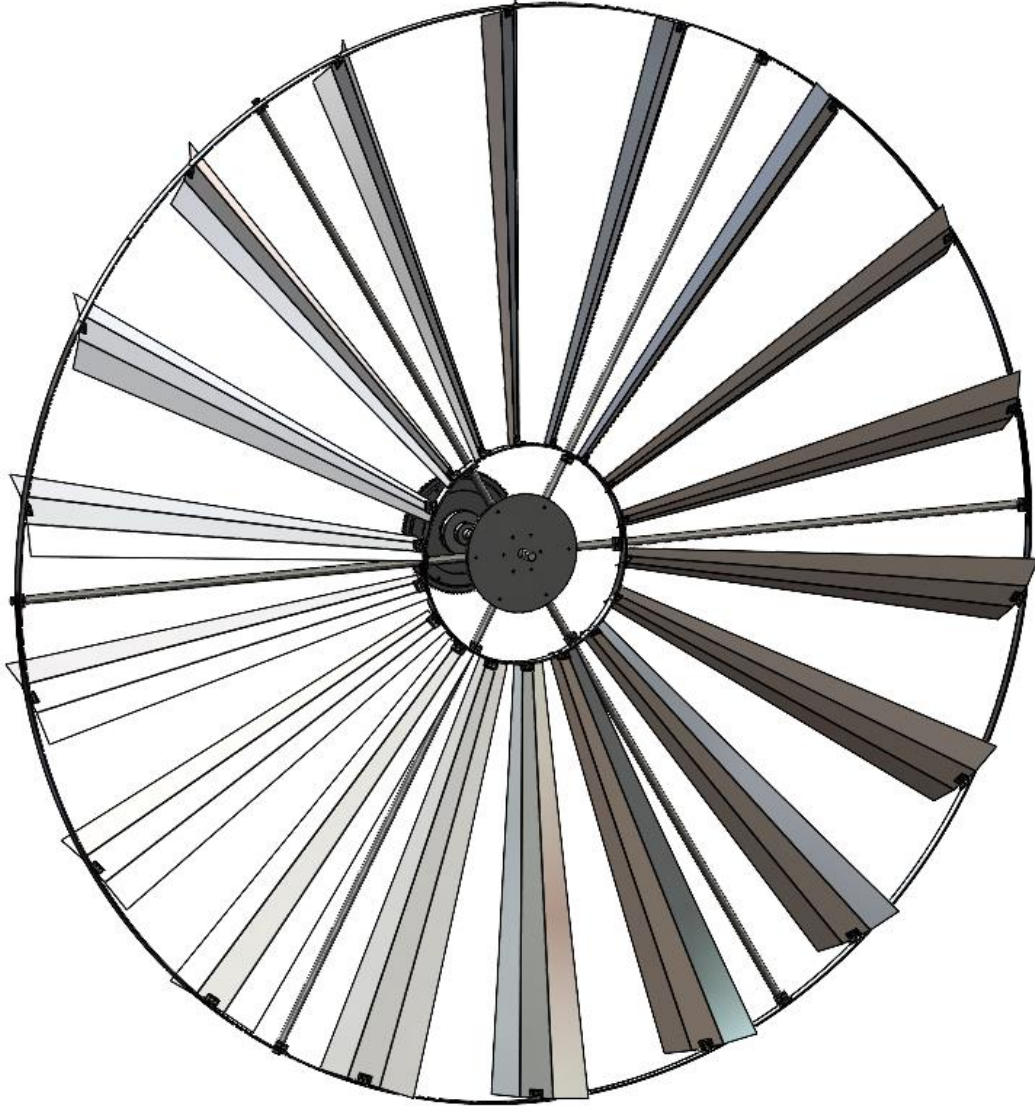
Figura 73 - Teste 10 - Razão de velocidades



Fonte: Autor (2024).

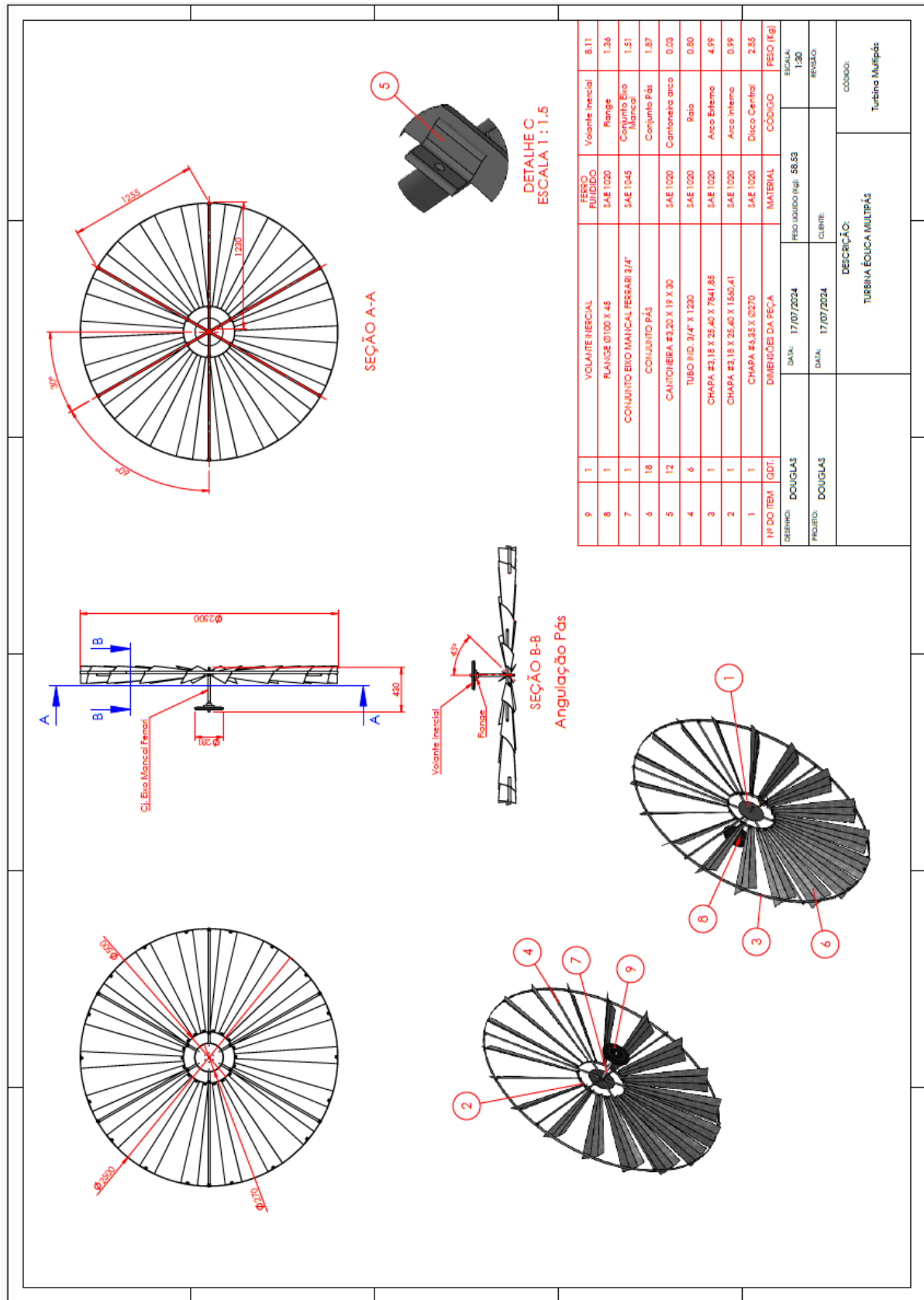
Apêndice B – Modelamento da turbina multipás no software

Figura 74 - Modelamento do conjunto girante no software

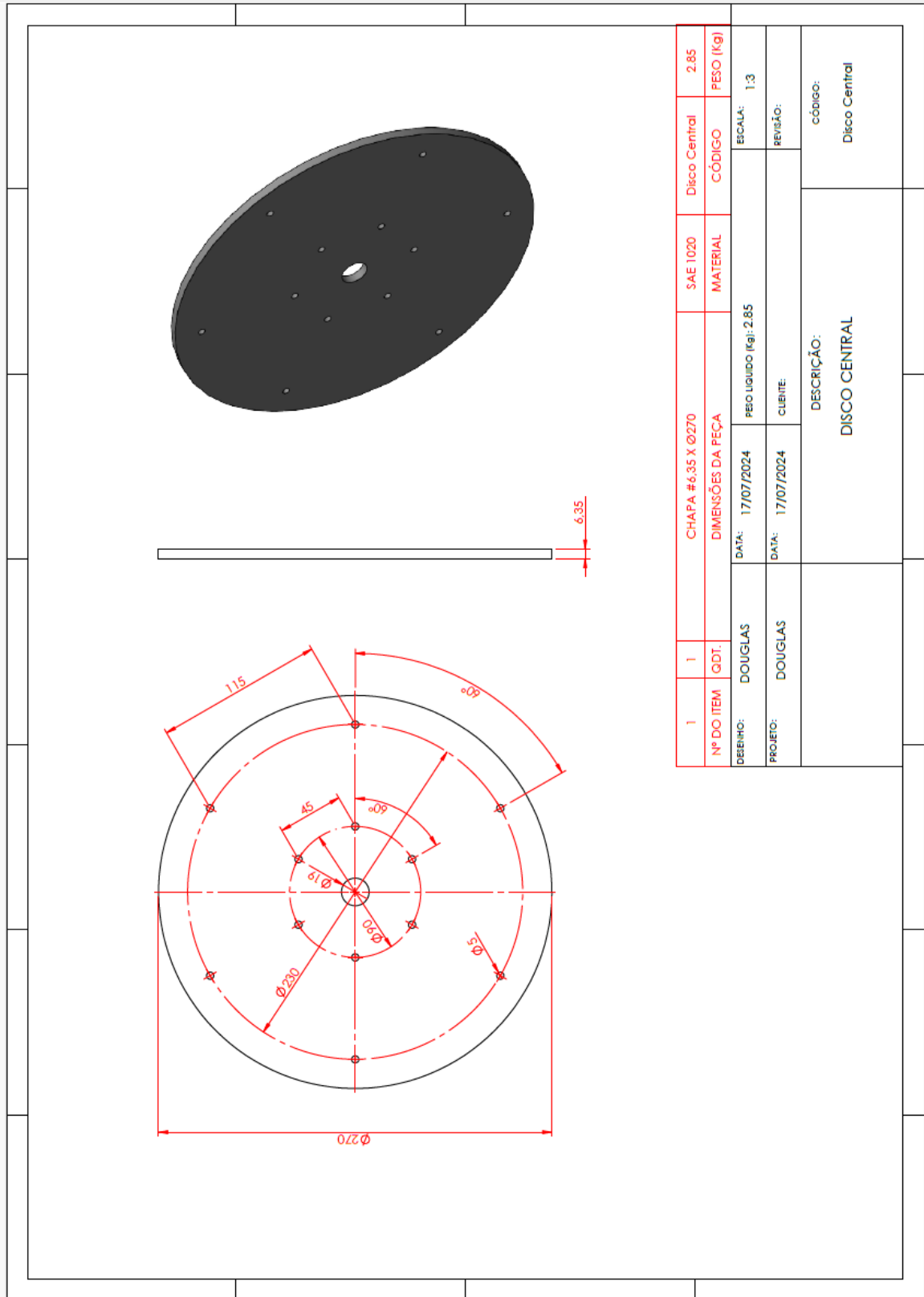


Fonte: Autor (2024).

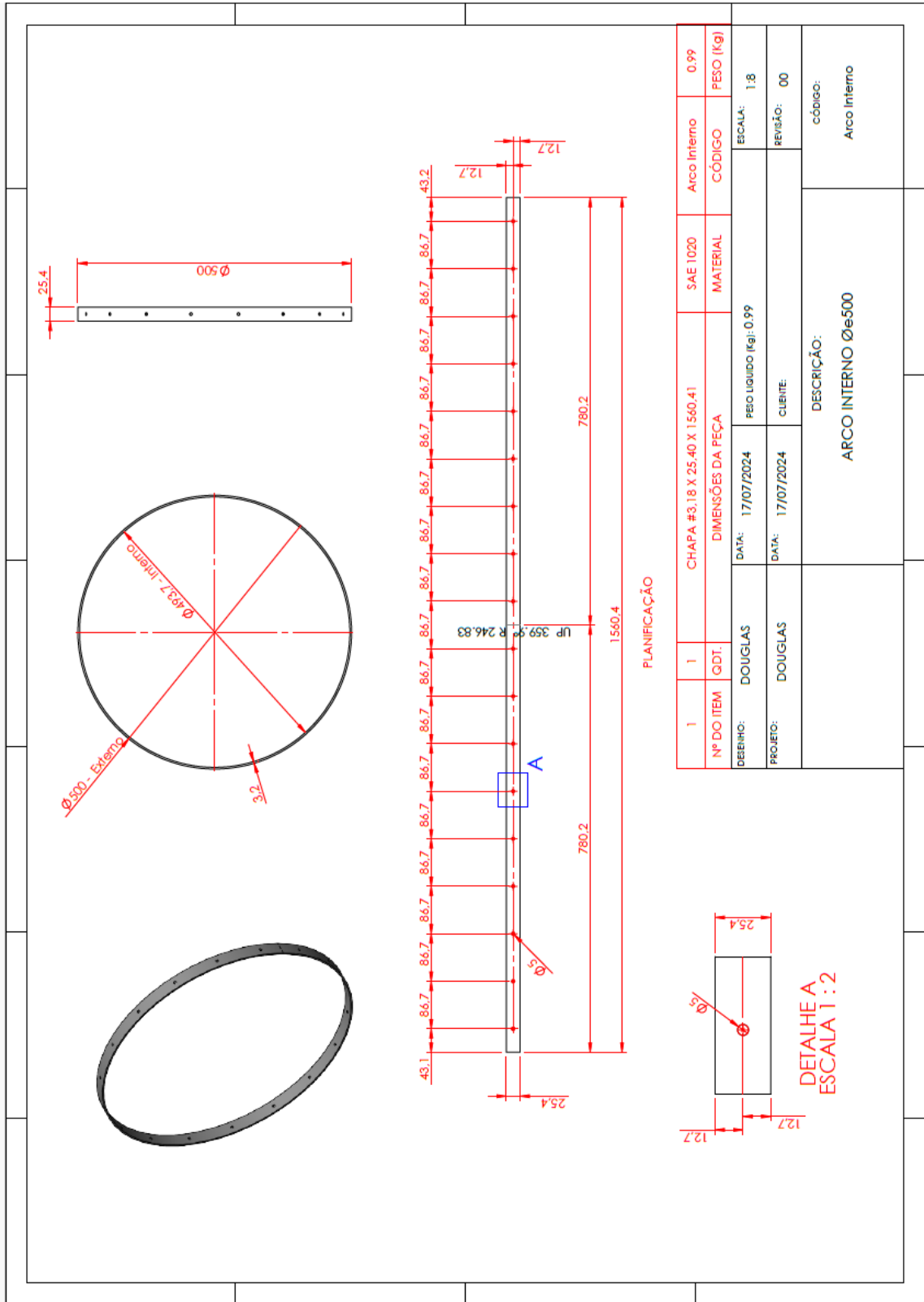
Apêndice C– Detalhamento do conjunto girante



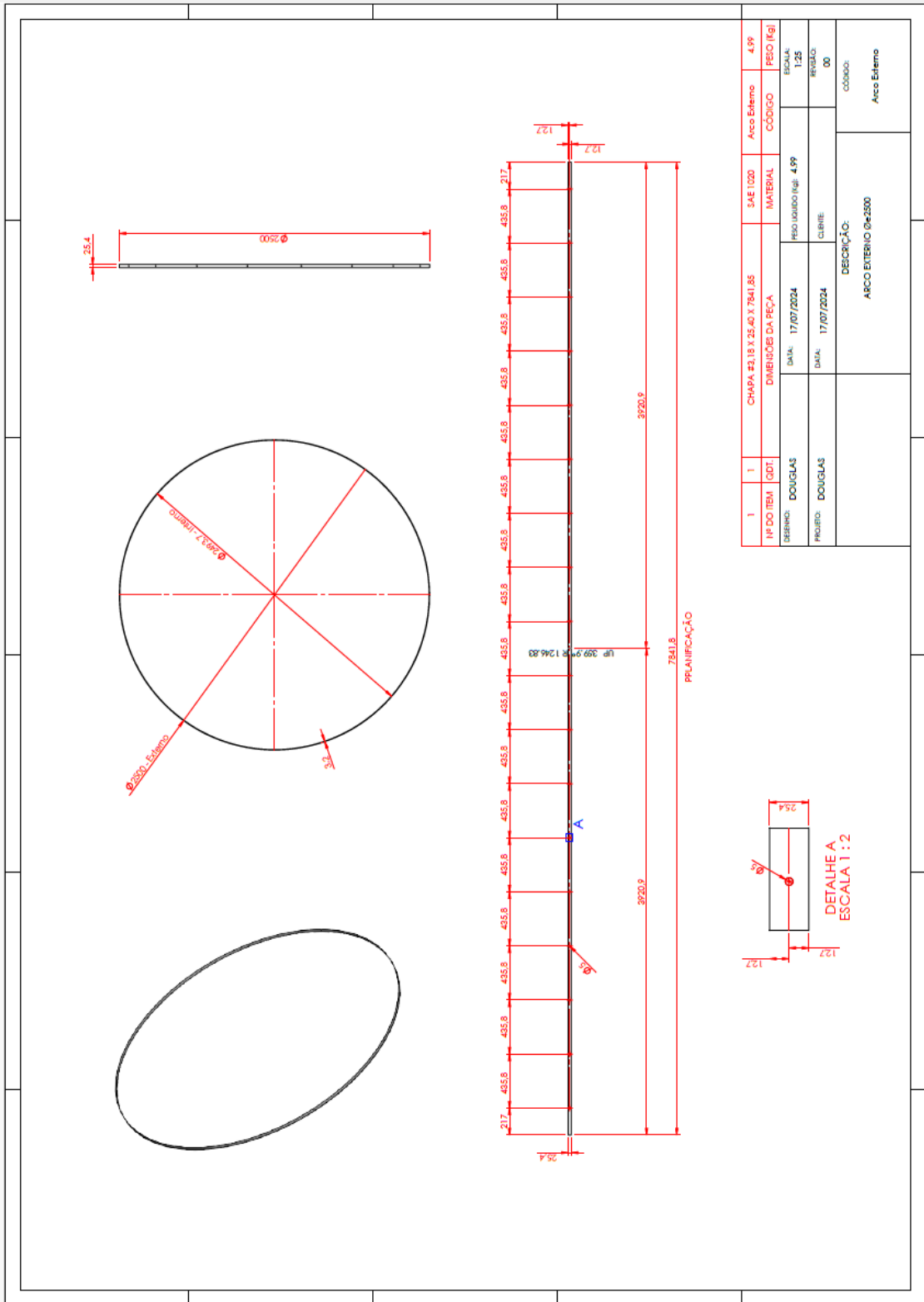
Fonte: Autor (2024).



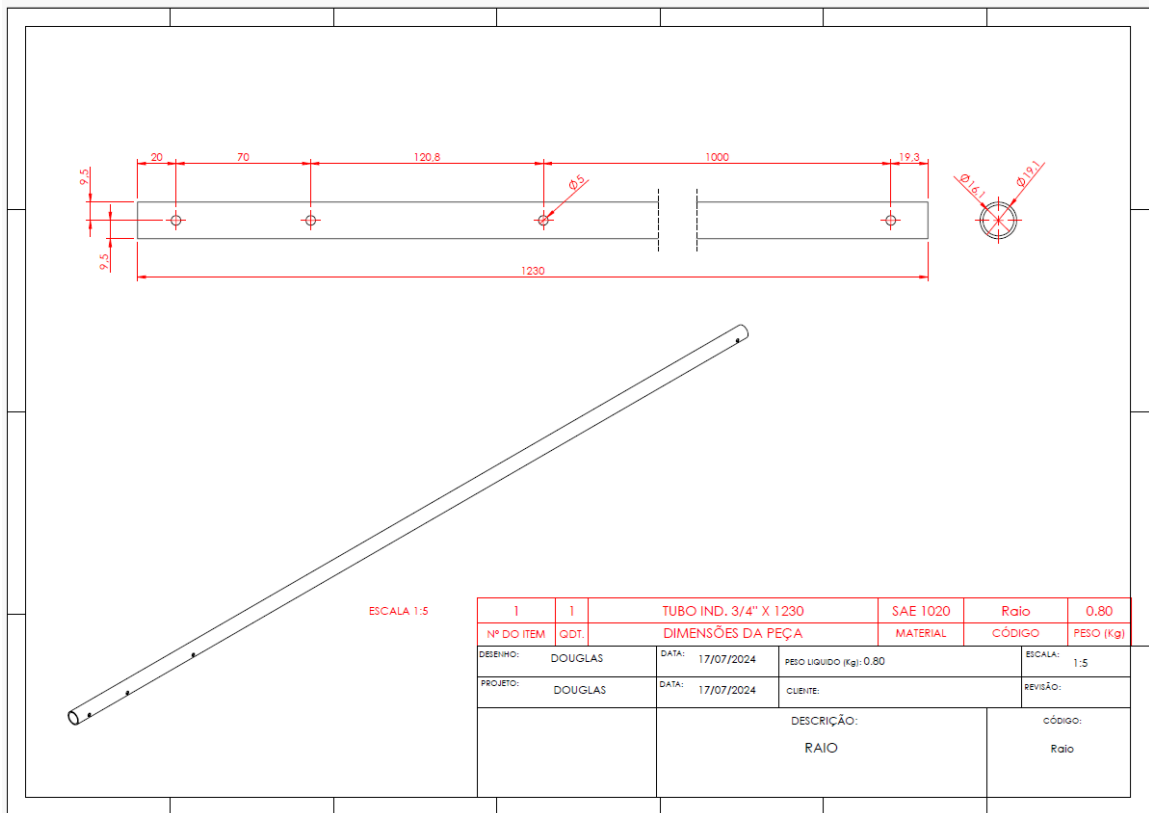
Fonte: Autor (2024).



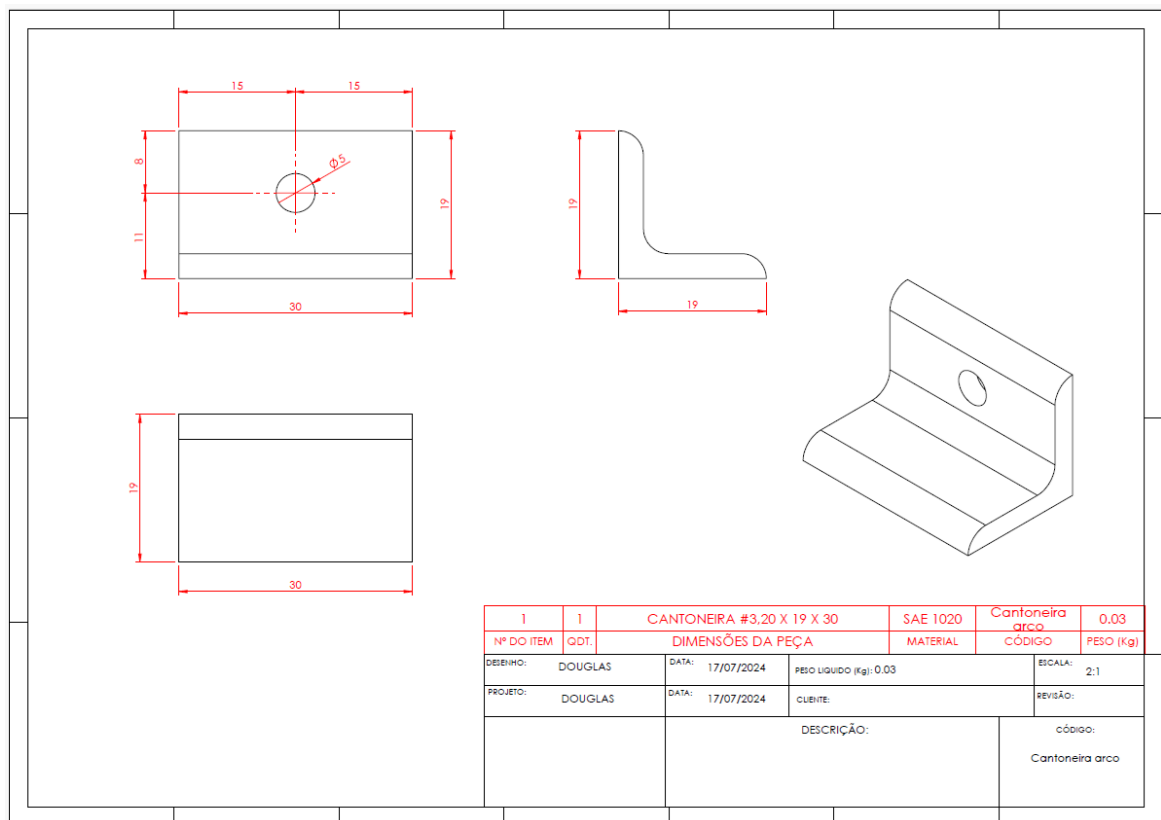
Fonte: Autor (2024).



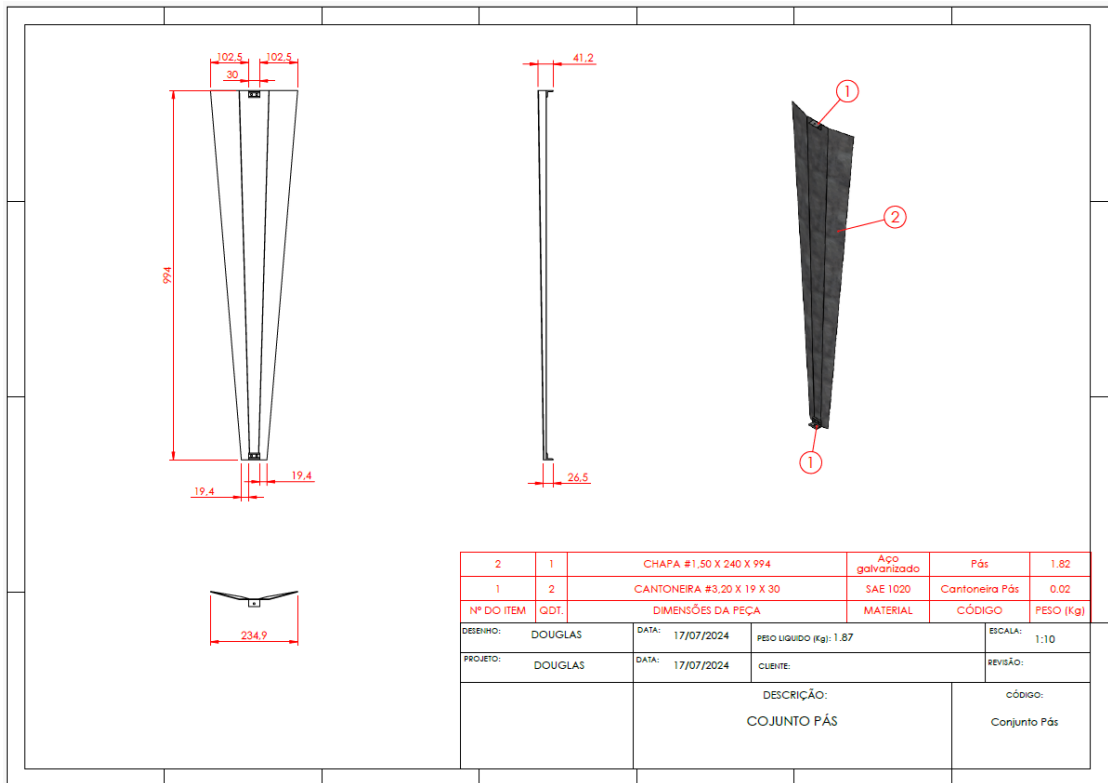
Fonte: Autor (2024).



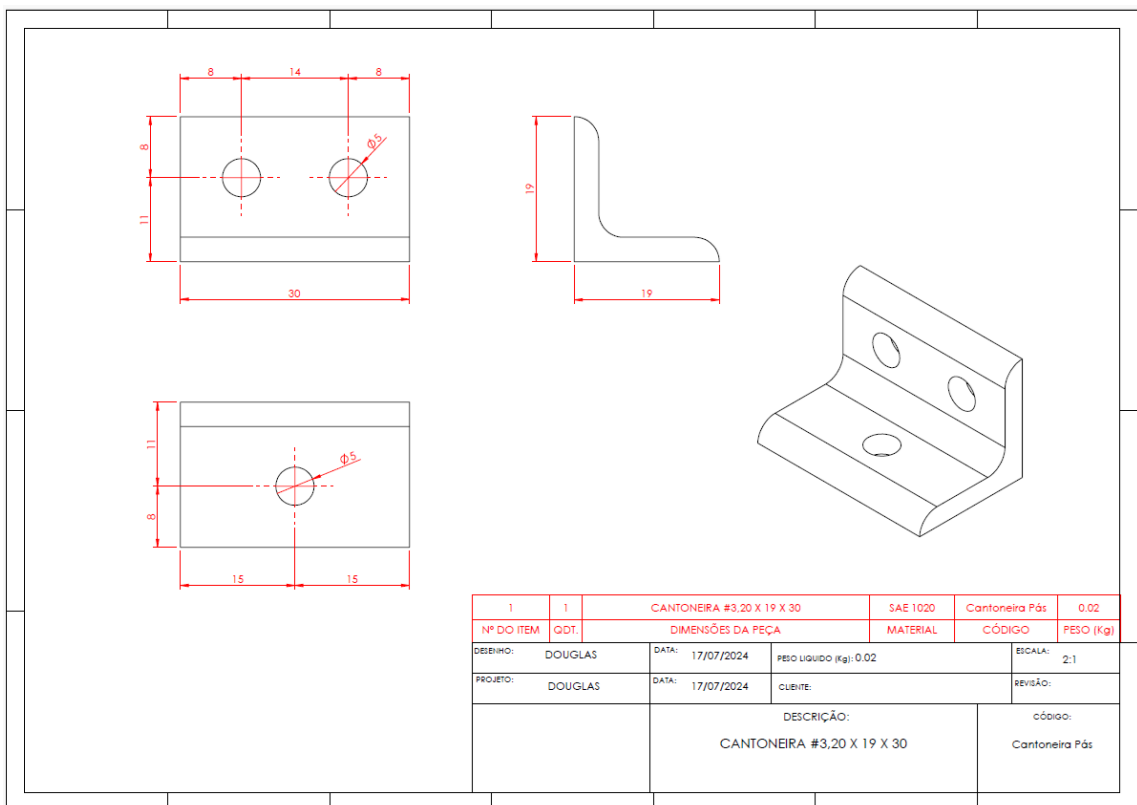
Fonte: Autor (2024).



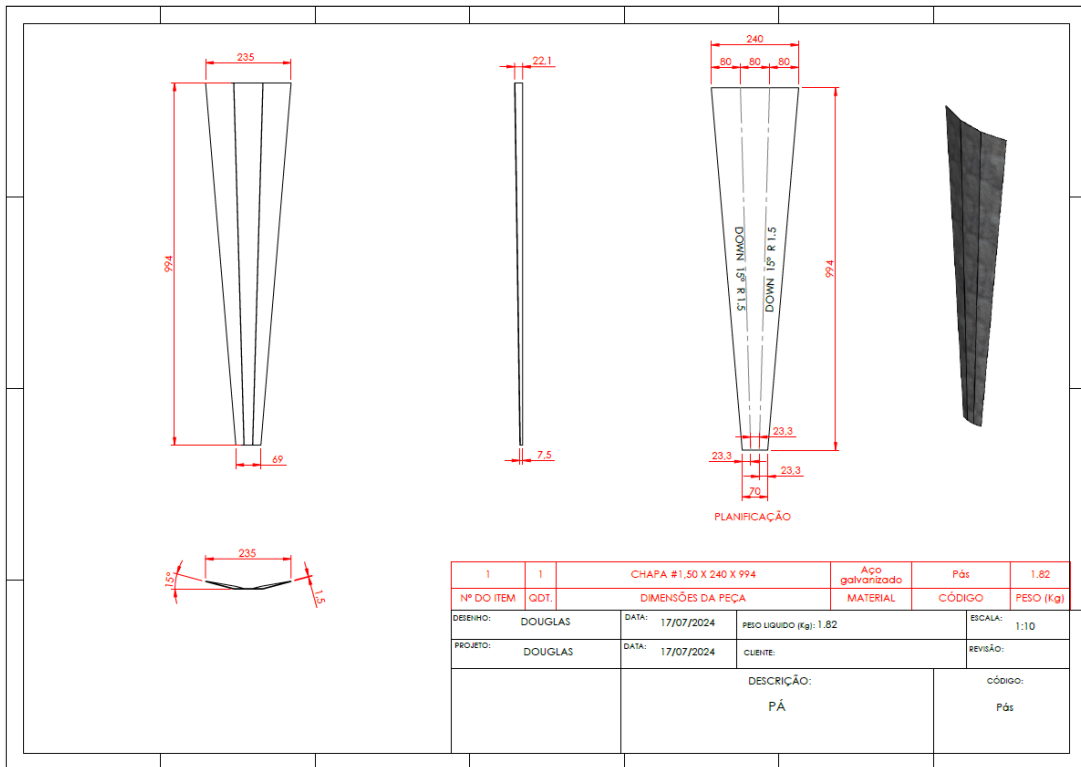
Fonte: Autor (2024).



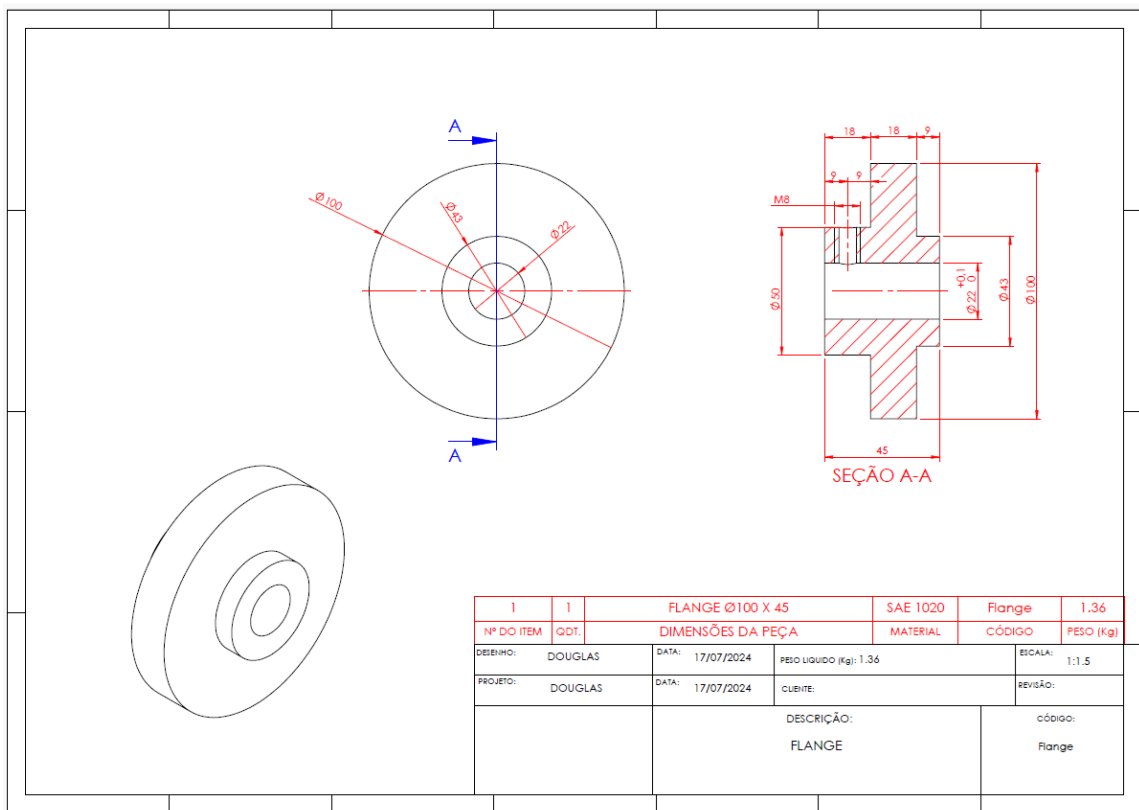
Fonte: Autor (2024).



Fonte: Autor (2024).



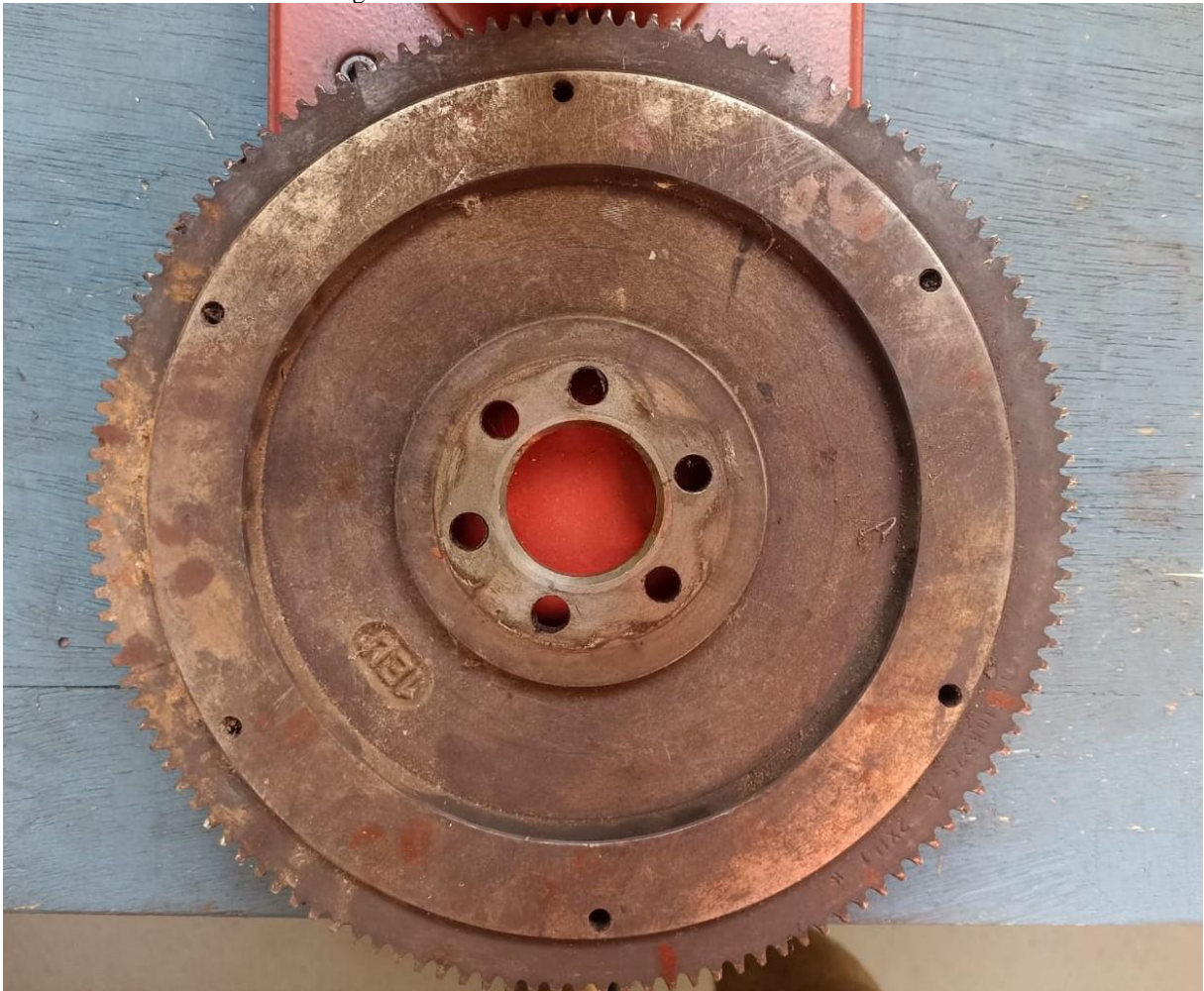
Fonte: Autor (2024).



Fonte: Autor (2024).

Apêndice D – Volante dentado automotivo

Figura 75 - Volante dentado automotivo 132 dentes



Fonte: Autor (2024).