

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO COM A UTILIZAÇÃO DE
MICROTURBINAS EÓLICAS NA SAÍDA DE EXAUSTORES DE AVIÁRIOS**

por

Alexandre Tassi Borille

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, outubro de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO COM A UTILIZAÇÃO DE
MICROTURBINAS EÓLICAS NA SAÍDA DE EXAUSTORES DE AVIÁRIOS**

por

Alexandre Tassi Borille

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Flávio Antonio Becon Lemos

Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Adriane Prisco Petry

Banca examinadora:

Prof.^a Dr.^a Adriane Prisco Petry – DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Sergio Viçosa Möller – DEMEC / UFRGS

Prof.^a Dr.^a Thamy Cristina Hayashi – DEMEC / UFRGS

Porto Alegre, outubro de 2022.

BORILLE, A.T. Análise de aproveitamento energético com a utilização de microturbinas eólicas na saída de exaustores de aviários. 2022. 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

Aviários de grande porte necessitam de quantidade elevada de energia elétrica para manter em funcionamento potentes exaustores, que contribuem para o bem-estar e crescimento adequado das aves. Devido ao elevado volume de ar necessário para manter uma temperatura ideal e renovar o ar no interior do aviário, parte da energia é perdida, tornando-se atrativo o seu aproveitamento. O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade da implementação de microturbinas eólicas na saída dos exaustores utilizados em aviários. Para isso, foram feitas diversas medições de velocidade do vento na saída de um exaustor em um aviário específico, e utilizado um disco atuador para simular a influência de uma microturbina eólica no escoamento do ar de exaustão na realização das medições. A partir dessas medições foram feitas várias análises para a obtenção da posição ótima de instalação da microturbina eólica e a potência ótima de geração, obtendo-se uma posição de 0,4 m de distância do bocal de saída do exaustor com uma potência nominal de aproximadamente 90 W. Com isso, considerando o melhor cenário, chegou-se a uma geração mensal para a microturbina de 65,7 kWh, gerando uma economia mensal de R\$ 44,96 e um retorno do investimento de 3,7 anos. Já para a hipótese mais conservadora, obteve-se uma geração mensal de energia elétrica de 17,93 kWh, gerando uma economia mensal de R\$ 12,27 e um tempo de retorno do investimento de aproximadamente 13 anos. Portanto, a partir dos cenários apresentados, conclui-se que a implementação de uma microturbina eólica não se mostra economicamente atrativa para o caso conservador, já para o caso do melhor cenário a atratividade é mais elevada, porém com maior incerteza associada.

PALAVRAS-CHAVE: Aviários, disco atuador, exaustores, energia, medições, microturbina eólica, potência elétrica.

BORILLE, A.T. Analysis of energy use with a micro wind turbine at the exit of aviary exhausts. 2022. 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

Large aviaries need a high amount of electrical energy to keep powerful exhaust fans in operation, which contribute to the well-being and adequate growth of the birds. Due to the high volume of air needed to maintain an ideal temperature and renew the air inside the aviary, part of the energy is lost, making its use attractive. The objective of this work is to analyze the feasibility of implementing wind microturbines at the output of exhaust fans used in aviaries. For that, several wind speed measurements were made at the exit of an exhaust fan in a specific poultry house, and an actuator disc was used to simulate the influence of a wind microturbine on the exhaust air flow when making the measurements. From these measurements several analyses were made to obtain the optimal installation position of the micro wind turbine and the optimal power generation, obtaining a position of 0.4 m away from the exhaust nozzle with a rated power of approximately 90 W. Thus, considering the best scenario, the monthly generation of the microturbine would be 65.7 kWh, generating a monthly savings of R\$ 44.96 and a return on investment of 3.7 years. For the most conservative hypothesis, the monthly electricity generation would be 17.93 kWh, generating monthly savings of R\$ 12.27 and a payback period of approximately 13 years. Therefore, from the presented scenarios, it is concluded that the implementation of a wind microturbine does not prove to be economically attractive for the conservative case, in the case of the best scenario, the attractiveness is higher, but with greater associated uncertainty.

KEYWORDS: Poultry house, actuator Disk, exhaust air flow, energy, measurements, wind microturbine, electrical power.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
1.1. Ventiladores Axiais (exaustores).....	2
1.2. Turbinas Eólicas	2
1.3. Energia do Vento	3
1.4. Teoria do Disco Atuador	3
1.5. Sistema de Ventilação em Aviários.....	6
1.6. Representação da microturbina como um disco atuador	6
2. METODOLOGIA	7
2.1. Características e Construção do Disco Atuador Utilizado	7
2.2. Características do Anemômetro Utilizado.....	8
2.3. Características do Exaustor	8
2.4. Medições.....	9
2.4.1. Medição Livre na Saída do Exaustor (Medição 1)	9
2.4.2. Medição Na Saída do Exaustor com a Presença do Disco Atuador (Medição 2) 10	
2.5. Análise Financeira	11
3. RESULTADO DAS MEDIÇÕES.....	11
3.1. Medição 1	11
3.2. Medição 2	12
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	13
4.1. Análise de Viabilidade Energética	13
4.2. Análise de Viabilidade Financeira Simplificada	18
5. CONCLUSÃO	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, atualmente, encontra-se na terceira colocação entre os maiores produtores de frango de corte do mundo, com uma produção anual em 2021 de 14,12 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2021). Já em relação ao consumo de frango, o Brasil está na quarta colocação no ranking mundial, com um consumo no ano de 2021 de 10,205 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2021). Sabe-se também que o gasto com a energia elétrica representa aproximadamente 33% dos gastos variáveis para um ciclo de produção em um aviário (PEREIRA, 2016), e dentro desse total de gasto com energia elétrica, grande parte se dá através da ventilação, representando em torno de 60% (ROVARIS, 2015).

Para o processo de criação de frangos de corte em aviários, a energia elétrica é um dos recursos mais importantes, visto que são necessários potentes exaustores, ligados à rede, funcionando durante todo o dia. Eles garantem que a temperatura dentro dos aviários fique de acordo com a temperatura necessária para o conforto das aves, que para a primeira semana de vida tem o valor entre 32°C e 35°C, para a segunda semana entre 29°C e 32°C, para a terceira entre 26°C e 29°C, chegando a 20°C na sétima semana (ABREU E ABREU, 2011), que é a semana de retirada das aves do aviário para fase de abate. Também há a importância na utilização dos exaustores para que não se acumulem gases provenientes dos dejetos expelidos pelas aves que fermentam na cama do aviário, como gases de amônia, por exemplo.

A análise proposta nesse trabalho está voltada aos conceitos de regeneração de energia e colheita de energia, ou seja; aproveitar uma energia que seria dissipada para que determinado trabalho (nesse caso, gerar uma diferença de pressão e, portanto, um escoamento de ar, entre o ambiente interno e externo do aviário) seja realizado. Segundo Priya (2007), podemos classificar a colheita de energia como uma forma de obter-se pequenas quantidades de energia a partir de fontes presentes no próprio meio ambiente. Essa energia pode ser utilizada instantaneamente para o funcionamento de pequenos equipamentos eletrônicos ou até mesmo ser armazenada em pequenas baterias para uso posterior.

Um exemplo de colheita de energia são os relógios automáticos, que não usam baterias e sim um sistema para o armazenamento de energia associado ao movimento do equipamento durante o uso e que garante o funcionamento dos relógios. Contudo, ele consiste em um sistema que transforma energia mecânica do movimento em energia mecânica nas engrenagens internas do relógio, e não em energia elétrica. Em 1931 essa tecnologia foi lançada, e pode ser classificada como colheita de energia, em que um conjunto de partes móveis é acionado com o próprio movimento do punho do usuário e “dão corda” no relógio, garantindo o seu funcionamento. Desde que o relógio esteja no punho do usuário a sua autonomia é “perpétua” contanto que exista algum tipo de movimento (apenas o balanço dos braços ao caminhar), já a sua autonomia fora do pulso é baixa, de aproximadamente 50 horas.

A colheita de energia pode ser feita a partir de diversas fontes presentes na natureza, como por exemplo, energia solar, energia eólica, calor (gradientes de temperatura), piezoeletricidade (diferença de potencial causado pela deformação de materiais específicos), entre outros (SCARSELLI et al., 2016).

A forma proposta para fazer o aproveitamento da energia cinética dos exaustores que seria dissipada no entorno dos aviários, no presente estudo, se dá através da instalação de microturbinas eólicas nas saídas dos exaustores dos aviários, portanto, no ambiente externo. Entretanto, caso a microturbina seja instalada a uma distância muito próxima da

descarga do exaustor, sua influência no escoamento deverá provocar uma redução importante da vazão produzida pelos equipamentos, fazendo assim com que o exaustor não opere da maneira com que ele foi projetado para operar. Caso a microturbina seja instalada a uma distância muito elevada da saída do exaustor, grande parte dessa energia já terá sido dissipada e pouco poderá ser coletado pela microturbina.

Face ao exposto acima, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise de viabilidade, baseado em dados experimentais, com a finalidade de compreender se há uma distância ótima em que seja possível converter, com a implementação de microturbinas eólicas, uma quantidade significativa da energia cinética remanescente do sistema de exaustão dos aviários, sem prejuízo ao desempenho do mesmo. A influência da turbina eólica no escoamento é representada por um modelo experimental de disco atuador.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A teoria em relação ao funcionamento de ventiladores axiais (exaustores), turbinas eólicas, e ao funcionamento dos sistemas de ventilação em aviários, é de suma importância para o desenvolvimento da análise proposta. A partir do conhecimento teórico desses assuntos será possível fazer as análises necessárias para então verificar a viabilidade, ou não viabilidade, do projeto proposto.

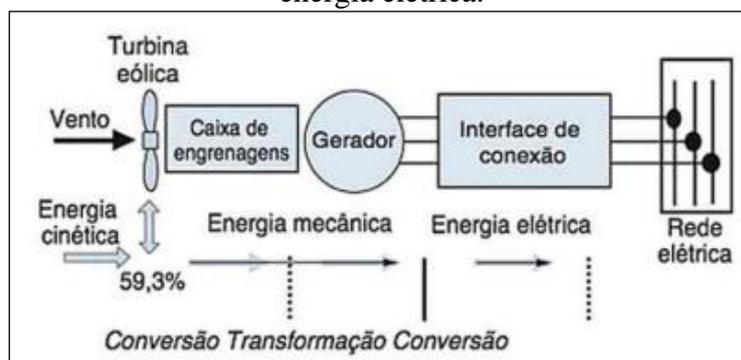
1.1. Ventiladores Axiais (exaustores)

Um ventilador axial (ventilador) pode ser definido como uma máquina de fluxo, que é constituída, basicamente, por um rotor e um estator. O rotor -constituído por discos ou tambores na periferia dos quais as pás, de perfis aerodinâmicos, são fixadas- é onde ocorre a transformação da energia mecânica, ele é o órgão principal de uma máquina de fluxo. Já o estator, também constituído de pás com perfis aerodinâmicos presas a uma carcaça externa fixa, serve para diminuir a rotação do escoamento na saída da máquina (HENN, 2006).

1.2. Turbinas Eólicas

As turbinas eólicas são dispositivos utilizados para a conversão da energia cinética do vento em energia elétrica. A seguir é mostrado, através da Figura 1, um esquema de como esse processo de conversão ocorre.

Figura 1 - O princípio da conversão da energia cinética do movimento do vento em energia elétrica.



Fonte: Fundamentos de energia eólica. PINTO, 2013.

Existem dois tipos principais de turbinas eólicas, as de eixo horizontal e as de eixo vertical.

- Turbina de eixo vertical: “Os projetos mais antigos de rotores eólicos destacavam rotores com o eixo de rotação vertical. No início, entretanto, os rotores com eixo vertical só podiam ser construídos como simples rotores de arrasto. A principal vantagem das máquinas de eixo vertical é que elas não precisam de nenhum tipo de controle de ajuste para mantê-las na direção do vento.” (PINTO,2013).

- Turbina de eixo horizontal: “Os conversores de energia eólica que possuem seu eixo de rotação na posição horizontal são compreendidos quase que exclusivamente sob as bases do conceito das hélices. Esse *design*, que inclui os moinhos de vento europeus e as turbinas eólicas modernas, é o princípio dominante na tecnologia eólica.” (PINTO,2013).

1.3. Energia do Vento

A energia cinética associada ao movimento do ar atmosférico pode ser chamada de energia eólica, caracterizada por permanente variação, tanto em sua direção quanto em sua intensidade. A energia cinética de uma quantidade de massa de ar m , com velocidade v é dada pela Equação 1 (CUSTÓDIO,2013),

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

Analisando a energia cinética do vento por unidade de tempo, teremos a potência do vento, ou potência eólica. Portanto, a expressão que representa a potência eólica é dada por (CUSTÓDIO,2013):

$$P = \dot{E} = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 \quad (2)$$

A vazão em massa de ar através de uma determinada área é dada por:

$$\dot{m} = \rho Av \quad (3)$$

Com isso, substituindo a Equação 3 na Equação 2, obtemos a equação da potência eólica disponível através de uma área de referência A (Equação 4) (CUSTÓDIO,2013).

$$P = \frac{1}{2}\rho A v^3 \quad (4)$$

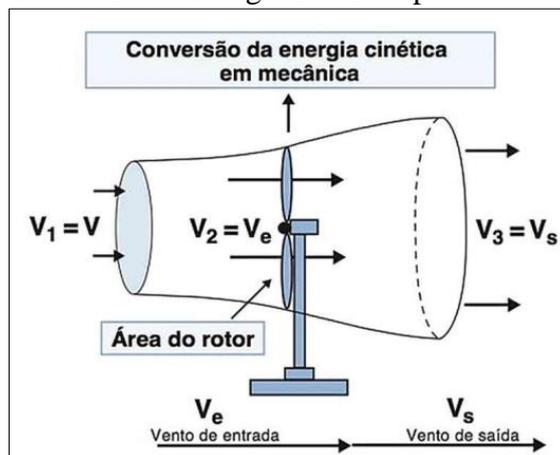
Na Equação 4: P é a potência disponível do vento (W), ρ é a massa específica do ar (kg/s), A é a área da seção transversal ultrapassada pelo vento (m^2) e v é a velocidade do vento (m/s).

1.4. Teoria do Disco Atuador

A turbina eólica é um componente que transforma a energia cinética do ar em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica, aerogeradores. Para que ocorra a conversão de parte da energia cinética do ar é necessário desacelerá-lo, porém apenas o ar que passa através do rotor aerodinâmico sofre essa desaceleração. Supondo um tubo de corrente (vide a Figura 2) que delimita o ar que escoar através do rotor, este representa

uma superfície limite (tanto a jusante quanto a montante) entre a parte afetada pela desaceleração das pás do rotor, e a parte não afetada. Essa superfície entre as partes afetadas e não afetadas é chamada de tubo de corrente e é formada por um conjunto de linhas de corrente, que, por definição, são tangentes ao vetor velocidade. Portanto, nenhum ar flui através do limite desse tubo, fazendo com que vazão em massa que escoo no sentido da corrente ao longo desse tubo seja a mesma para qualquer posição.

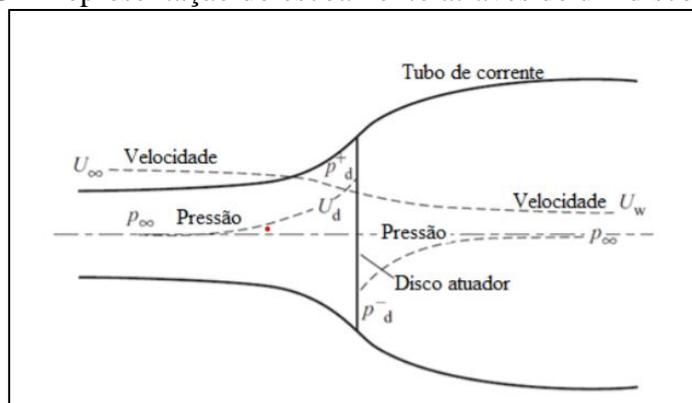
Figura 2 – Conversão da energia do vento por uma turbina eólica.



Fonte: Fundamentos de energia eólica. PINTO, 2013.

A interação do escoamento do ar com uma turbina eólica pode ser analisada a partir da teoria do disco atuador (BURTON et al., 2021), a Figura 3 apresenta um esquema gráfico do processo de conversão de energia neste tipo de equipamento. A análise da interação aerodinâmica de uma turbina eólica e o escoamento de ar, mais especificamente como ocorre o processo de conversão da energia, é feita empregando um disco atuador como mostrado na Figura 3, que é um dispositivo teórico utilizado para substituir, para fins de simplificação, o papel do rotor e das pás da turbina. À medida que o ar interage com o rotor aerodinâmico, ocorre uma queda da pressão estática, com isso o ar, ao sair pela parte a jusante do rotor, fica à uma pressão abaixo da pressão atmosférica. O ar então segue a uma pressão estática mais baixa e ao longo do escoamento, quando atinge uma certa distância a pressão volta a se equalizar com a pressão atmosférica.

Figura 3 – Representação do escoamento através de um disco atuador.



Fonte: Adaptado de BURTON et al., 2021.

Na Figura 3 é possível observar que o tubo de corrente a montante do disco atuador tem uma área de seção menor que a área do disco e uma área maior a jusante, na

região da esteira (*wake*). A vazão em massa que passa através de cada área de seção é representada pela Equação 3. Considerando a conservação da massa através do tubo de corrente, a vazão que passa por cada seção é a mesma, conforme a Equação 5.

$$\rho(vA)_\infty = \rho(vA)_d = \rho(vA)_w \quad (5)$$

O símbolo ∞ se refere ao escoamento não perturbado à montante, d se refere às condições na seção do disco atuador e w às condições a jusante.

O disco atuador induz uma variação de velocidade que é sobreposta à velocidade de corrente livre, portanto podemos representá-la por $-av_\infty$, sendo a chamado de fator de indução axial do disco atuador. Portanto, a velocidade líquida no disco no sentido da corrente é apresentada pela Equação 6, a seguir.

$$v_d = v_\infty - av_\infty = v_\infty(1 - a) \quad (6)$$

A partir desta definição, aplicando-se o princípio da conservação da quantidade de movimento linear, utilizando a Equação 6 e aplicando a *Bernoulli* em um volume de controle à montante do disco atuador e outro à jusante, fazendo alguns ajustes matemáticos, chega-se na Equação 7, que é a equação que representa a velocidade na esteira da turbina (BURTON et al., 2021).

$$v_w = v_\infty(1 - 2a) \quad (7)$$

Analisando a Equação 7 é possível observar que o fator de indução do disco atuador (a) pode variar entre os valores de 0 e 0,5, sendo que para o valor 0 a velocidade v_w fica com um valor igual a v_∞ e para o valor 0,5 a velocidade v_w assume um valor de 0.

Definidas as velocidades atuantes no disco atuador, a jusante e a montante dele, é possível obter o coeficiente de potência (Cp), definido como a razão entre a potência extraída do escoamento pela turbina e a potência disponível no vento (Equação 4), expressão apresentada na Equação 8.

$$Cp = \frac{Pot}{P} \quad (8)$$

Sendo relacionado ao fator de indução axial através da Equação 9 (BURTON et al., 2021),

$$Cp = 4a * (1 - a)^2 \quad (9)$$

em que Pot é a potência extraída pela turbina, P é a potência disponível e Cp é o coeficiente de potência.

Com as equações que representam o coeficiente de potência definidas, é possível obter-se o máximo valor teórico para esse coeficiente calculando-se a derivada da Equação 9 em relação à a e igualando a zero, como mostrado a seguir.

$$\frac{dCp}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0 \quad (10)$$

A partir da Equação 10, observa-se que o valor de a é 1/3. Dessa forma:

$$C_p = \frac{16}{27} = 0,593 = 59,3\% \quad (11)$$

Esse (Equação 11) é coeficiente de potência máximo teórico que pode ser atingido, chamado de coeficiente de potência de *Betz*.

1.5. Sistema de Ventilação em Aviários

Segundo estudo publicado por GREEN (2019), as características de ventilação para o aviário mudam conforme as aves crescem e de acordo com as condições do clima, envolvendo desde o fornecimento de uma quantidade mínima de ar fresco (independente da temperatura externa) quando está frio, ao provimento de alta velocidade do ar para manter as aves com conforto em condições quentes e/ou úmidas.

Ao longo de períodos de clima frio, o propósito da ventilação é suprir uma troca de ar suficiente para retirar o excesso de umidade e manter a qualidade do ar, mantendo ao mesmo tempo, a temperatura do aviário no nível esperado (também conhecido como ponto de ajuste, ou a temperatura que mantém as aves na sua zona de conforto). Durante períodos de clima quente e/ou úmido, a finalidade da ventilação é retirar o excedente de calor e fornecer o resfriamento por meio do efeito de resfriamento pelo vento, formado pelo movimento do ar e resfriamento evaporativo.

Com a finalidade de fazer o ar fluir dentro e fora do aviário, é necessária a existência de uma diferença de pressão entre a parte interna e a parte externa. Grande parte dos aviários utilizam ventilação com pressão negativa. No momento em que os ventiladores são desligados, a pressão externa e a pressão dentro do aviário mantêm-se equilibradas. Por essa razão, se as portas ou entradas de ar laterais forem abertas o ar não fluirá para dentro ou fora do aviário, considerando que não haja vento no ambiente externo. Em um aviário hermeticamente fechado, quando um exaustor for ligado, o ar irá sair através dos próprios exaustores e a pressão externa será maior do que a pressão interna. Na área da ventilação isso é conhecido como “pressão negativa”.

A partir do momento que houver uma pressão negativa no aviário, haverá também um fluxo de ar, independentemente do local de instalação dos exaustores. A velocidade com que o ar passa pelas entradas de ar está diretamente relacionada com a pressão negativa.

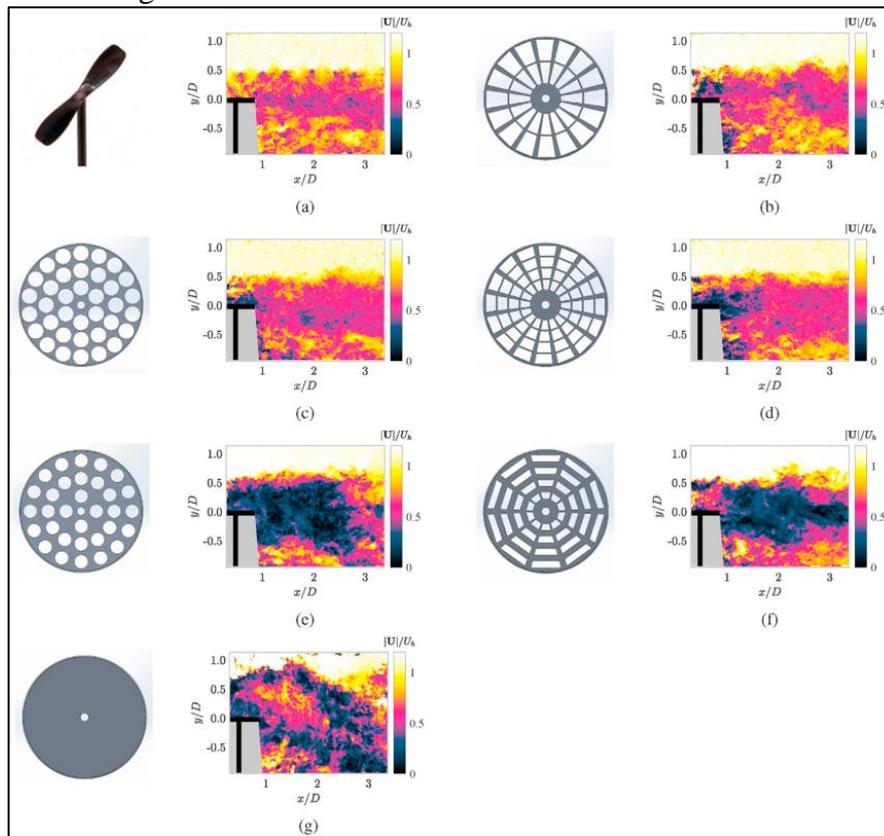
1.6. Representação da microturbina como um disco atuador

Podemos definir um disco atuador como um modelo simplificado de uma turbina eólica de eixo horizontal, podendo ser utilizado tanto em simulações numéricas quanto em experimentos. Ele é utilizado pois a estrutura de um disco estático é mais simples e fácil de utilizar em relação à um rotor em movimento. Os discos atuadores também são menos dispendiosos em termos de recursos e mais fáceis de fabricar para utilização em massa para experimentos, e muitas vezes mais robustos em relação às hélices de uma turbina rotativa.

Segundo HEARST (2020), em seu artigo “A Comparison of lab-scale free rotating wind turbines and actuator disks”, um disco atuador pode ser comparado a uma turbina eólica em termos de influência no escoamento do vento. Em seu estudo, HEARST (2020) fez uma análise do impacto do disco atuador em um escoamento forçado em um túnel de vento utilizando vários discos atuadores com geometrias e porosidades diferentes, e os comparou com o impacto de uma turbina eólica. Na Figura 5, é mostrado cada um dos

discos atuadores utilizados na análise e as respectivas influências causadas no escoamento por cada um deles.

Figura 5 – Formatos dos Discos Atuadores utilizados



Fonte: HEARST, 2020.

A conclusão do estudo feito por HEARST (2020) foi que o disco representado, na Figura 5, pela letra b foi o que mais se assemelhou à uma turbina rotativa, portanto para as análises feitas no aviário foi construído um disco atuador com as mesmas proporções, mesma geometria e a mesma porosidade (proporção entra parte vazada e parte sólida) do disco do estudo.

2. METODOLOGIA

Essa seção apresenta a metodologia utilizada para a realização das medições para a obtenção, de maneira experimental, de uma possível distância ótima para a implementação de uma microturbina eólica

2.1. Características e construção do disco atuador utilizado

O disco atuador utilizado no presente estudo para simular uma microturbina eólica, foi projetado com utilização de isopor como material principal e reforçado com fibra de vidro e cola. As dimensões escolhidas foram 1,4 m de diâmetro e 7 cm de espessura e uma porosidade de 65%. A estrutura final do disco é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Disco atuador utilizado no projeto



Fonte: Autor, 2022.

2.2. Características do anemômetro utilizado

Para a obtenção da velocidade do vento na saída do exaustor foi utilizado um anemômetro digital da marca BTMETER. As especificações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela1 – Especificações do Anemômetro

Modelo	BT-100
Intervalo de Velocidade	0,3 a 30 m/s
Intervalo de Temperatura	-10 a 45°C
Precisão da Velocidade	± 5 %
Precisão da Temperatura	± 2°C
Resolução	0,1 m/s e 0,2°C

Fonte: Manual, BTMETER.

2.3. Características do exaustor

O exaustor, da marca Tecnoesse, em que foram feitas as medições, estava instalado em um aviário com um lote de aves em fase de crescimento. As medições foram feitas em um período de aproximadamente 3 horas de funcionamento do mesmo. A seguir, na Tabela 2, são descritas algumas das principais características do exaustor utilizado.

Tabela 2 – Especificações do Exaustor

Modelo	TS50
Número de Pás	6
Potência	1,5 CV
Diâmetro pré difusor	1,27 m
Diâmetro pós difusor	1,6 m

Fonte: Manual, Tecnoesse.

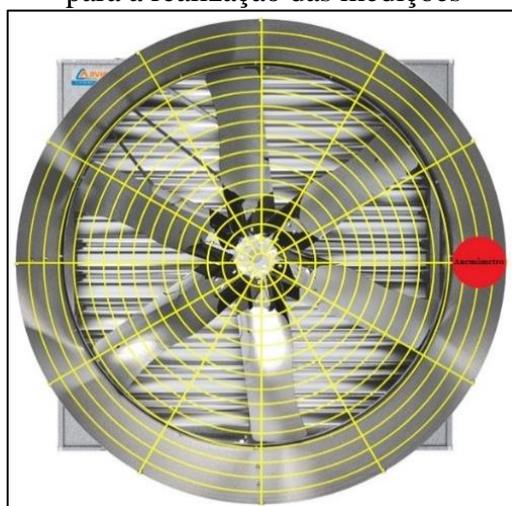
2.4. Medições

Para a obtenção de um perfil de velocidade na direção axial, após a saída do exaustor sem interferência, e com interferência (com implementação do disco atuador) foram feitas diversas medições, em várias posições, variando-se a distância tanto do disco atuador como do anemômetro, em relação à saída do exaustor. A seguir será mostrado detalhadamente como foram feitas cada uma das medições.

2.4.1. Medição livre na saída do exaustor (Medição 1)

Inicialmente, com o objetivo de se obter o perfil de velocidade de vento livre na saída do exaustor, alocou-se o anemômetro na posição, em relação ao raio, onde obteve-se a maior velocidade, ilustrado na Figura 7.

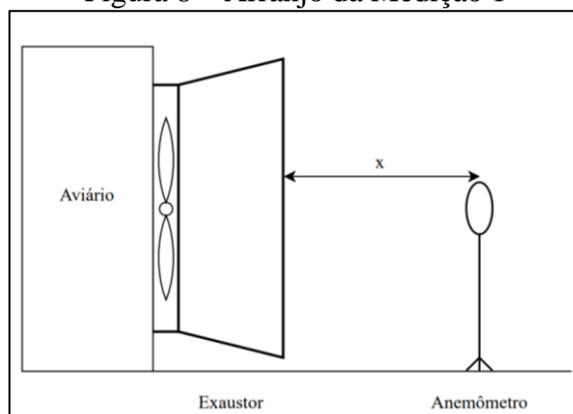
Figura 7 – Ilustração da posição, em relação ao raio, do anemômetro (em vermelho) para a realização das medições



Fonte: Autor, 2022.

Definida a posição radial, realizaram-se dez medições, variando-se de 10 em 10 centímetros a distância do anemômetro em relação ao exaustor, conforme ilustrado na Figura 8. Repetiu-se esse processo três vezes, totalizando trinta medições a fim de minimizar possíveis erros de medição.

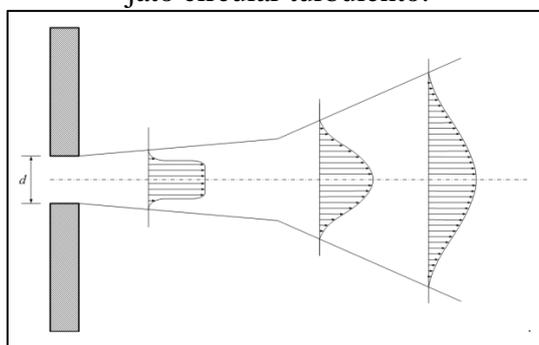
Figura 8 – Arranjo da Medição 1



Fonte: Autor, 2022.

A distância axial máxima de medição foi de 1m, inferior a uma vez o diâmetro de saída do jato (D), considerando a estrutura esperada para um jato circular turbulento, essa região próxima à área de descarga do jato (distâncias de 4 a 7 D) possui teoricamente uma velocidade quase uniforme, como ilustra MOREIRA, 2011, estrutura esperada do jato esquematizada na Figura 9. Desta forma, assume-se a hipótese de que a velocidade medida na posição radial fixa definida, representa a velocidade do jato em cada posição x .

Figura 9 – Estrutura esperada para perfis radiais de velocidade média no tempo para um jato circular turbulento.

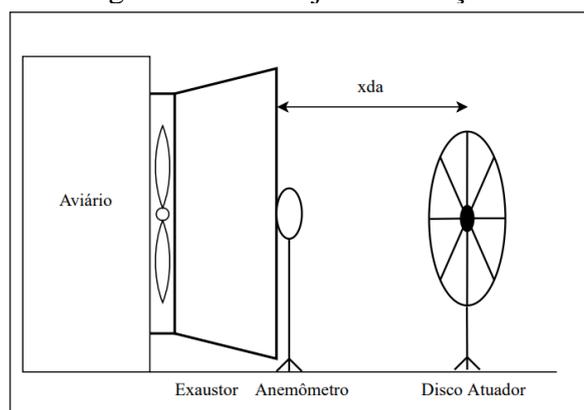


Fonte: MOREIRA,2011.

2.4.2. Medição na saída do exaustor com a presença do disco atuador (Medição 2)

Partindo do arranjo apresentado na Figura 7, foi fixado o anemômetro no terminal do exaustor, visando-se a obter as velocidades na saída do equipamento, com a implementação de um disco atuador no escoamento. A partir disso realizaram-se novamente dez medições, variando-se a posição do disco atuador de 10 em 10 centímetros, conforme ilustrado na Figura 10. Repetiu-se esse processo três vezes, totalizando 30 medições.

Figura 10 – Arranjo da Medição 2



Fonte: Autor, 2022.

2.5. Análise financeira

Após a obtenção da potência ótima da microturbina implementada, foi realizada uma breve análise financeira do projeto, a partir da geração de energia, com o possível cálculo da economia mensal prevista com essa quantidade de energia elétrica produzida, para dessa forma obter-se uma estimativa do *payback*, tempo de retorno de investimento, para esse projeto.

3. RESULTADO DAS MEDIÇÕES

3.1. Medição 1

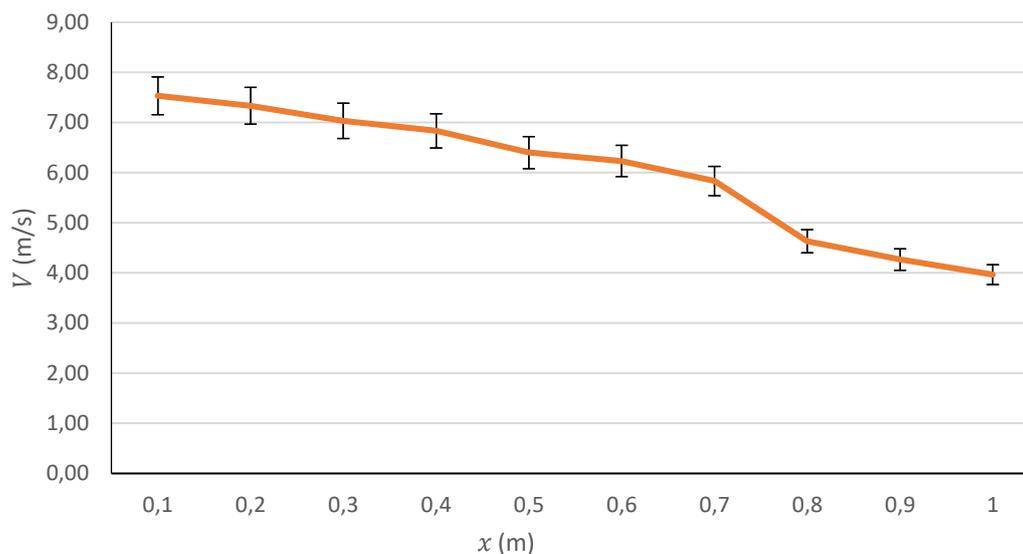
Dados de velocidade livre (V) obtidos através da Medição 1. Foi realizada a média aritmética das três medições, para mitigar os possíveis erros de medição. Os dados obtidos na Medição 1 são apresentados na Tabela 3 e na Figura 11.

Tabela 3 – Resultado da Medição 1 (velocidade livre).

x (m)	V (m/s) Medição a	V (m/s) Medição b	V (m/s) Medição c	V (m/s) Média
0,1	$7,6 \pm 5\%$	$7,5 \pm 5\%$	$7,5 \pm 5\%$	7,533
0,2	$7,2 \pm 5\%$	$7,4 \pm 5\%$	$7,4 \pm 5\%$	7,333
0,3	$7 \pm 5\%$	$7 \pm 5\%$	$7,1 \pm 5\%$	7,033
0,4	$6,8 \pm 5\%$	$6,9 \pm 5\%$	$6,8 \pm 5\%$	6,833
0,5	$6,4 \pm 5\%$	$6,4 \pm 5\%$	$6,4 \pm 5\%$	6,400
0,6	$6,3 \pm 5\%$	$6,2 \pm 5\%$	$6,2 \pm 5\%$	6,233
0,7	$5,8 \pm 5\%$	$5,8 \pm 5\%$	$5,9 \pm 5\%$	5,833
0,8	$4,8 \pm 5\%$	$4,5 \pm 5\%$	$4,6 \pm 5\%$	4,633
0,9	$4,4 \pm 5\%$	$4,2 \pm 5\%$	$4,2 \pm 5\%$	4,266
1,0	$4 \pm 5\%$	$4 \pm 5\%$	$3,9 \pm 5\%$	3,966

Fonte: Autor, 2022.

Figura 11 – Média da velocidade livre em função da distância a jusante do exaustor.



Fonte: Autor, 2022.

3.2. Medição 2

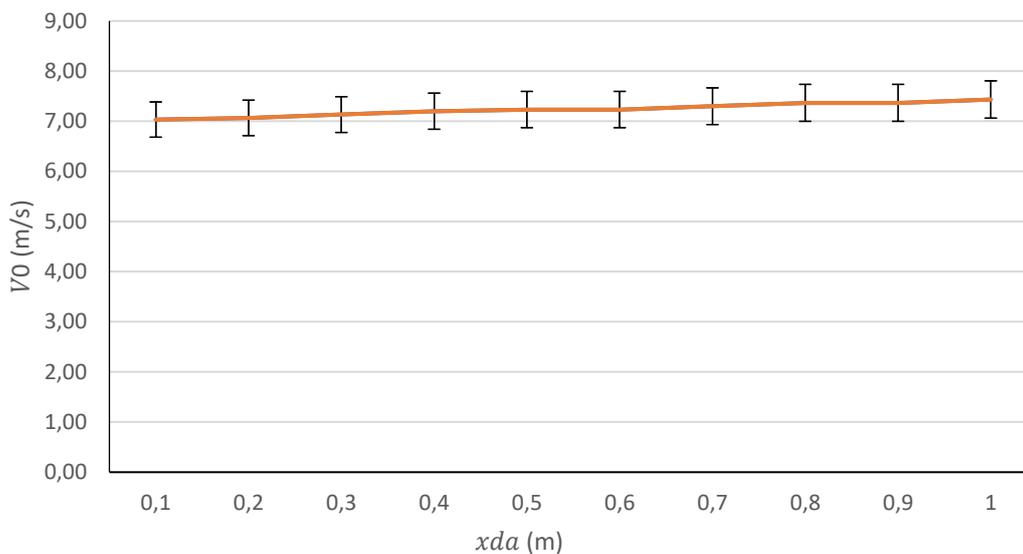
A partir dos dados obtidos através da Medição 2 (velocidade na saída do exaustor na presença do disco atuador), também se realizou uma média aritmética para a obtenção dos dados finais de velocidade. Esses dados são apresentados a partir da Tabela 4 e Figura 12.

Tabela 4 – Resultados da Medição 2 (velocidade na presença do disco atuador).

x_{da} (m)	V_0 (m/s) Medição a	V_0 (m/s) Medição b	V_0 (m/s) Medição c	V_0 (m/s) Média
0,1	$7,2 \pm 5\%$	$7,0 \pm 5\%$	$6,9 \pm 5\%$	7,033
0,2	$7,2 \pm 5\%$	$7,0 \pm 5\%$	$7,0 \pm 5\%$	7,066
0,3	$7,3 \pm 5\%$	$7,1 \pm 5\%$	$7,0 \pm 5\%$	7,133
0,4	$7,3 \pm 5\%$	$7,2 \pm 5\%$	$7,1 \pm 5\%$	7,200
0,5	$7,3 \pm 5\%$	$7,2 \pm 5\%$	$7,2 \pm 5\%$	7,233
0,6	$7,3 \pm 5\%$	$7,2 \pm 5\%$	$7,2 \pm 5\%$	7,233
0,7	$7,4 \pm 5\%$	$7,2 \pm 5\%$	$7,3 \pm 5\%$	7,300
0,8	$7,4 \pm 5\%$	$7,3 \pm 5\%$	$7,4 \pm 5\%$	7,366
0,9	$7,4 \pm 5\%$	$7,3 \pm 5\%$	$7,4 \pm 5\%$	7,366
1,0	$7,5 \pm 5\%$	$7,4 \pm 5\%$	$7,4 \pm 5\%$	7,433

Fonte: Autor, 2022.

Figura 12 – Média da velocidade na saída do exaustor em função da posição do disco atuador.



Fonte: Autor, 2022.

Observa-se que o anemômetro utilizado tem uma incerteza de $\pm 5\%$. Considerando-se a velocidade na saída do exaustor/difusor sem a influência do disco atuador, apresentada na Tabela 1, $V(0,1)$ de 7,53 m/s, a incerteza associada ao anemômetro é de $\pm 0,376$ m/s. As diferenças encontradas para as velocidades de saída sob influência do disco atuador (Tabela 2) são superiores a esta incerteza apenas para as posições do disco atuador x_{da} menores do que 0,4 m. A partir do distanciamento de 0,4 m a velocidade na saída do exaustor/difusor apresenta variações menores do que a incerteza do equipamento de medição. Sendo assim, as análises serão realizadas considerando os valores medidos, observando a coerência dos resultados com o comportamento esperado, ou seja, ao afastar o disco atuador da saída do duto de descarga do exaustor, ocorre uma redução da influência da presença do disco atuador.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Análise de viabilidade energética

A partir da obtenção das velocidades, tanto livre (sem influência do disco atuador) como com a implementação do disco atuador, pôde-se iniciar a análise para a obtenção da distância ideal de instalação da microturbina.

Para se obter a velocidade do ar que efetivamente está disponível na posição proposta para a microturbina. Foi admitido de que a razão de decaimento da velocidade na direção axial para o caso da instalação da turbina é semelhante à razão observada no jato livre, avaliada pela Medição 1. Desta forma, a partir das velocidades V e V_0 , pode-se obter a velocidade disponível que incide sobre o disco V_{disp} , para as diferentes distâncias x_{da} , conforme a Equação 12.

$$V_{disp}(x_{da}) = V_0(x_{da}) \left[\frac{V(x = x_{da})}{V(0,1)} \right] \quad (12)$$

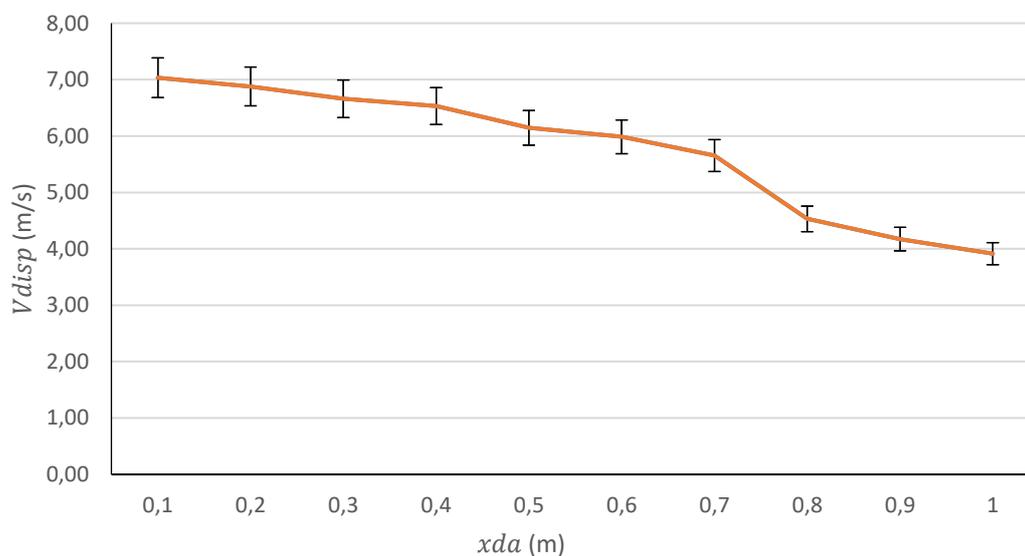
Os resultados são apresentados na Tabela 5 e na Figura 13.

Tabela 5 – Velocidades na entrada do disco atuador V_{disp} em função distância x_{da}

x_{da} (m)	V_{disp} (m/s)
0,1	7,03
0,2	6,88
0,3	6,66
0,4	6,53
0,5	6,14
0,6	5,98
0,7	5,65
0,8	4,53
0,9	4,17
1,0	3,91

Fonte: Autor, 2022.

Figura 13 – Velocidade na entrada do disco atuador V_{disp} para cada distância x_{da}



Fonte: Autor, 2022.

Com a velocidade disponível na entrada do disco atuador calculada, podemos então obter a potência disponível para cada uma das distâncias x_{da} . Esse cálculo é feito a partir da Equação 13.

$$P_{disp}(x_{da}) = \frac{1}{2} \rho [V_{disp}(x_{da})]^3 A_{disco} \quad (13)$$

Na Equação 13, $P_{disp}(x_{da})$ é a potência disponível considerando a instalação da turbina (disco atuador, no presente estudo) em determinada distância da saída do exaustor x_{da} (W), ρ é a massa específica do ar (kg/s), A_{disco} é a área da seção transversal do disco ultrapassada pelo vento (m²) e $V_{disp}(x_{da})$ é a velocidade na entrada do disco na determinada distância x_{da} (m/s).

Os resultados de potência são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Potência disponível P_{disp} em função da x_{da} .

x_{da} (m)	P_{disp} (W)
0,1	321,35
0,2	300,67
0,3	272,83
0,4	257,29
0,5	214,33
0,6	198,02
0,7	166,82
0,8	85,91
0,9	67,08
1,0	55,38

Fonte: Autor, 2022.

Com as potências disponíveis calculadas, foi possível obter a potência elétrica a ser produzida pela microturbina para cada uma das distâncias, a partir da utilização da Equação 14.

$$P_{turb} = P_{disp} * C_p \quad (14)$$

em que P_{turb} é a potência elétrica gerada pela microturbina (W) e C_p é o coeficiente de potência elétrica da microturbina.

Para a escolha do valor do coeficiente de potência mais adequado para uma microturbina foi utilizado o estudo de GARRÉ (2015), em que foi feita a avaliação de dois aerogeradores. No estudo utilizando pás ótimas de *Betz* e pás ótimas de *Betz* modificadas de pequeno porte em um túnel de vento, obteve-se um valor de coeficiente de potência para a microturbina com pás ótimas de *Betz* de aproximadamente 0,35. Portanto, utilizando o valor de 0,35 para o C_p obteve-se os valores para estimativa das potências elétricas produzidas, descritas a seguir (Tabela 7), para cada uma das distâncias medidas.

Tabela 7 – Estimativa de potência elétrica produzida P_{turb} em função da distância x de posicionamento da turbina.

x (m)	P_{turb} (W)
0,1	112,47
0,2	105,23
0,3	95,49
0,4	90,05
0,5	75,02
0,6	69,31
0,7	58,39
0,8	30,07
0,9	23,48
1,0	19,38

Fonte: Autor, 2022.

Para o restante da análise, também foi necessário o cálculo da potência de escoamento livre (P_{livre}) no bocal de saída do exaustor.

$$P_{livre}(0,1) = \frac{1}{2} \rho [V(0,1)]^3 A_{ex} \quad (15)$$

em que $P_{livre}(0,1)$ é a potência do escoamento livre na saída do exaustor (W), A_{ex} é a área de saída do difusor do exaustor (m^2) e $V(0,1)$ é a velocidade do escoamento livre da influência do disco atuador, na saída do difusor do exaustor (m/s) (Tabela 3).

O valor obtido foi de 515,85 W.

A última potência calculada para a elaboração da análise proposta, foi a potência do escoamento de ar no ponto zero (P_0), considerando a presença do disco atuador posicionado nas distâncias (x_{da}) de 0,1m a 1m. Esse cálculo foi feito através da Equação 16 e o resultado das potências é apresentado na Tabela 8.

$$P_0(x_{da}) = \frac{1}{2} \rho [V_0(x_{da})]^3 A_{ex} \quad (16)$$

em que $P_0(x_{da})$ é a potência do escoamento de ar no ponto zero, considerando a influência de posicionar o disco atuador em determinada distância do disco x_{da} (W) e $V_0(x_{da})$ é a velocidade do vento no ponto zero, considerando a influência de posicionar o disco atuador em determinada distância x_{da} (m/s) (Tabela 4).

Tabela 8 – Potências do vento no ponto zero $P_0(x_{da})$ em função distância do disco x_{da}

x_{da} (m)	$P_0(x_{da})$ (W)
0,1	419,80
0,2	425,80
0,3	437,97
0,4	450,36
0,5	456,64
0,6	456,64
0,7	469,39
0,8	482,37
0,9	482,37
1,0	495,58

Fonte: Autor, 2022.

Dando sequência, foi estimada a perda de potência do escoamento na saída do exaustor para cada distância de posicionamento de implementação do disco atuador. Essa perda foi estimada através da Equação 15, que se dá pela diferença entre a potência livre logo na saída do exaustor subtraída das potências no ponto zero, porém com o disco atuador nas diferentes posições x_{da} .

$$\Delta P_0(x_{da}) = P_{livre}(0,1) - P_0(x_{da}) \quad (17)$$

Os resultados do cálculo de perda de potência do escoamento a jusante do exaustor com a presença do disco atuador são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Perda de potência na saída do exaustor/difusor (ΔP_0) para cada distância do disco atuador x_{da}

x_{da} (m)	$\Delta P_0(x_{da})$ (W)
0,1	96,05
0,2	90,05
0,3	77,88
0,4	65,49
0,5	59,21
0,6	59,21
0,7	46,46
0,8	33,49
0,9	33,49
1,0	20,27

Fonte: Autor, 2022.

Com as perdas calculadas para todas as posições de implementação do disco atuador, é possível obter qual é distância ótima para a instalação da microturbina eólica. Para isso, foi utilizada a potência que poderia ser gerada pela turbina (P_{turb}) em cada posição x e subtraída das perdas na saída do exaustor (ΔP_0) para cada uma das posições (em que essa diferença é representada pela variável Dif), o ponto em que essa diferença tiver o maior valor será o ponto ótimo para a instalação da microturbina e essa diferença será a potência líquida que poderá ser extraída. O resultado desse cálculo é apresentado na da Tabela 10.

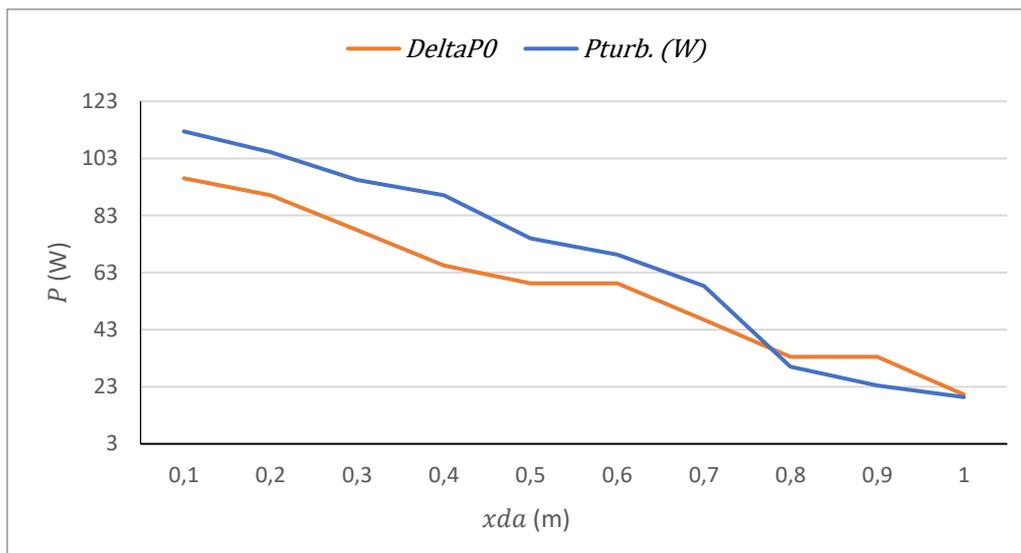
Tabela 10 – Diferença entre P_{turb} e ΔP_0 para as diferentes distâncias x

x (m)	P_{turb} (W)	ΔP_0 (W)	$Dif.$ (W)
0,1	112,47	96,05	16,43
0,2	105,23	90,05	15,18
0,3	95,49	77,88	17,61
0,4	90,05	65,49	24,56
0,5	75,01	59,21	15,81
0,6	69,30	59,21	10,10
0,7	58,39	46,46	11,92
0,8	30,07	33,49	-3,42
0,9	23,48	33,49	-10,00
1,0	19,38	20,27	-0,89

Fonte: Autor, 2022.

Para uma melhor análise do ponto ótimo para a instalação da microturbina foi feito um gráfico (Figura 14) em que é plotada a curva de P_{turb} e ΔP_0 .

Figura 14 – Comportamento de P_{turb} e ΔP_0 em função da distância x_{da} de posicionamento da turbina.



Fonte: Autor, 2022.

A partir do resultado apresentado na Tabela 10 é possível observar que o ponto em que ocorre a maior diferença entre P_{turb} e ΔP_0 é na posição $x_{da} = 0,4m$ (também é possível analisar através da Figura 14), nessa posição foi identificado o maior saldo positivo entre a variação da potência do escoamento na saída do exaustor/difusor e a potência produzida pela turbina, resultando em uma potência líquida com o valor de 24,562 W. Também é possível analisar tanto pela Tabela 10 como pela Figura 14 que a diferença entre P_{turb} e ΔP_0 assume valores negativos para algumas posições, indicando que para esses pontos a quantidade de energia reduzida a partir da implementação da microturbina é maior do que a energia convertida pela mesma, mostrando assim uma inviabilidade de instalação para essas posições.

4.2. Análise de viabilidade financeira simplificada

Partindo-se do princípio de que pelo menos 50% dos exaustores dos aviários ficam ligados durante 24 horas por dia e 7 dias por semana, pode-se assumir que a microturbina eólica produz durante esse mesmo período, uma vez que ambos operam em conjunto.

Para essa análise será utilizada a tarifa de energia elétrica do Paraná, região onde foram realizadas as medições, na área de concessão da distribuidora de energia COPEL. A tarifa de energia (TE) com impostos (PIS/COFINS e ICMS) para o Grupo B2 Classe Rural em setembro de 2022 custava 0,31104 R\$/kWh (COPEL, 2022) e o valor da taxa do uso do sistema de distribuição (TUSD) com impostos, para essa mesma classe de consumo, tinha o valor de 0,37334 R\$/kWh.

Considerando que a média de horas em um mês do ano é de 730 horas, a microturbina eólica (com uma potência de 90W, Tabela 7) teria uma produção de aproximadamente 65,7 kWh.

Na melhor hipótese, considerando que a posição da turbina a 0,4 m de distância do ponto de descarga do exaustor para a atmosfera não reduz a velocidade de descarga, visto que a variação de velocidade registrada nas medições (Tabela 2) é menor que a incerteza de medição do anemômetro. Multiplicando o valor de energia produzida pela turbina no mês pela tarifa de energia mais tarifa de uso do sistema (TE+TUSD), representa uma economia mensal de R\$ 44,96.

O custo de implantação de uma turbina de 90 W é da ordem de R\$ 2000 (considerando o custo médio por kW nominal instalado das 3 pequenas turbinas do estudo

de SILVEIRA, 2021), em uma análise simplificada, com a economia mensal de R\$ 44,96, o tempo para recuperar o investimento seria de 3,7 anos.

Caso consideremos uma hipótese mais conservadora, levando em conta a redução de velocidade de descarga medida, o saldo entre redução de potência do escoamento de descarga e a potência produzida pela turbina na posição 0,4 m, temos 24,562 W (Tabela 10), resultando em um saldo de 17.930 Wh (17,93 kWh) pela tarifa total considerada (TE+TUSD com impostos), obtemos o valor de economia mensal de R\$ 12,27. Essa é quantidade monetária que poderia ser economizada por exaustor (e conseqüentemente por microturbina instalada).

Levando em conta que para realizar toda a instalação para o funcionamento da microturbina, seria necessário dispendir um total de R\$ 2.000,00 (SILVEIRA, 2021), o tempo para o retorno do investimento, apenas considerando o investimento inicial, desse projeto, com a hipótese conservadora, seria de aproximadamente 163 meses, ou 13 anos, mostrando assim a inviabilidade de implementação do projeto pelo longo período de retorno do investimento.

A análise foi feita para instalação de apenas uma microturbina, caso fossem instaladas duas microturbinas, por exemplo, a geração seria o dobro, porém o custo de instalação iria dobrar também. Dessa forma, a análise para apenas uma microturbina é suficiente para demonstrar o baixo nível de atratividade da proposta.

5. CONCLUSÃO

A produção de frangos de corte no Brasil tem grande relevância global e para isso é necessário dispendir grandes quantidades de energia elétrica para proporcionar, através de potentes exaustores, um ambiente ideal para que as aves possam crescer de maneira mais eficiente. Considerando que este processo tem um custo elevado com energia elétrica, foi realizado um estudo da análise de viabilidade técnica e econômica de instalação de microturbina eólica na saída exaustores de aviários. Os dados de velocidade de vento necessários para o estudo foram obtidos experimentalmente em um aviário localizado no Paraná, ao longo do mês de março de 2022.

Medições em campo foram realizadas e a modelagem experimental da influência da turbina na descarga dos exaustores foi realizada empregando a metodologia de representar o aerogerador por um disco atuador. Levando em conta que os exaustores expõem parte da energia para o ambiente externo, obteve-se informações suficientes para analisar a viabilidade da implementação de uma microturbina eólica visando o reaproveitamento dessa energia. Foi encontrada uma potência líquida, considerando a potência produzida pelo aerogerador e a redução de potência do escoamento na descarga do conjunto exaustor/difusor devido à influência da turbina no escoamento de 24,562 W, instalando a microturbina eólica no ponto ótimo, a uma distância de 0,4 metros da saída do bocal do exaustor. A partir dessa geração da microturbina, seria possível obter uma economia mensal de R\$ 12,27, com um tempo de retorno considerando apenas o capital investido de aproximadamente 13 anos. Na hipótese mais favorável ao projeto, levando em conta a incerteza da medição de velocidade e desprezando a redução de velocidade medida com a presença do disco atuador no escoamento, a partir do ponto onde esta diferença de velocidade é menor do que a incerteza, ou seja 0,376 m/s, o tempo de recuperação do valor investido seria de 3,7 anos, com economia mensal de R\$ 44,96.

A partir dos dados obtidos ao longo da análise, a implementação de uma microturbina eólica não é muito atrativa economicamente. Os dados obtidos mostram que uma quantidade de energia não desprezível (na saída do exaustor existe uma ordem de potência associada a energia cinética da massa de ar superior a 500W por exaustor,

Equação 13) é dissipada no ambiente externo e novos estudos, empregando outras metodologias poderiam ser conduzidos para reduzir incertezas e verificar a viabilidade de outras soluções. Turbinas eólicas de menor custo e menos influência no escoamento, como a Savonius (AKWA, 2010) poderiam ser avaliadas. Outra alternativa seria utilizar maneiras menos custosas para o aproveitamento desta energia, por exemplo, um caso particular de colheita de energia que não seja através de microturbinas eólicas.

Uma sugestão de estudo futuro para o caso do exaustor específico, pode ser feita utilizando como base o trabalho “Analysis of the Power Generated by the Bistable Flow Around Circular Cylinders” (HABOWSKI, 2020), em que o autor discorre sobre a geração de energia a partir do escoamento turbulento que atravessa dois cilindros circulares paralelos. Esse escoamento passando pelos cilindros gera um fenômeno chamado biestabilidade, em que os cilindros passam a girar em torno de um eixo central, e dessa forma existe a possibilidade de geração de energia elétrica ao serem acoplados a um gerador. Esse sistema geraria uma quantidade de energia menor que uma microturbina eólica, porém também teria um custo significativamente menor para ser implementado (pela sua simplicidade) e ao mesmo tempo haveria a possibilidade de produzir um arrasto aerodinâmico menor em relação à microturbina, gerando assim menores perdas de potência na saída do exaustor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, V. M. N. & ABREU, P. G. (2011). **Os desafios da ambiência sobre os sistemas de aves no Brasil**. Revista Brasileira de Zootecnia, 40(256):1-14. Acesso em: 10/10/2021.

AKWA, J. V. (2010). **Análise Aerodinâmica de Turbinas Eólicas Savonius Empregando Dinâmica dos Fluidos Computacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. p. 149. 2010.

BURTON, T. et al. (2021). **Wind Energy Handbook**. 3ª Edição. Hoboken, NJ: Wiley, 2021.

COPEL. **Taxas e Tarifas de energia elétrica**. Disponível em: <<https://www.copel.com/site/copel-distribuicao/tarifas-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 17/09/2022.

CUSTÓDIO, R. S. **Energia eólica para produção de energia elétrica**. 2ª Edição. Rio de Janeiro. Synergia, Acta, Abeeólica, 2013.

EMBRAPA. (2021). **Central de inteligência de aves e suínos**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/cias/estatisticas/frangos/mundo>>. Acesso em: 15/09/2021.

GARRÉ, S. O. **Avaliação Experimental Do Desempenho Aerodinâmico De Pequenas Turbinas Eólicas Confeccionadas Em Prototipagem 3D**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. p. 171. 2015.

GRENN, B. (2019). **Princípios Básicos do Manejo de Ventilação**. 2019. Disponível em: <https://eu.aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/Portuguese/AviagenEssentialVentilationManagement-2019-PT.pdf>. Acesso em: 10/08/2021.

HABOWSKI, P. B. (2020). **Analysis of the Power Generated by the Bistable Flow Around Circular Cylinders**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. p. 146. 2020.

HEARST, J. R. **A comparison of lab-scale free rotating wind turbines and actuator disks**. 2020. Published by Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104485>>. Acesso em: 23/01/2022.

HENN, E. A. L. **Máquinas de Fluido**. 2ª Edição. Santa Maria: Editora UFSM, 2006.

MOREIRA, L.Q. (2020). **Modelagem Matemática de Jatos em Desenvolvimento Espacial Usando a Metodologia Pseudo Espectral de Fourier**. 2011. Tese. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

PEREIRA, Filipe J. M. (2016). **Avaliação dos Consumos Energéticos em Instalações Agropecuárias**. 2016. 82 folhas. Universidade de Coimbra, Faculdade de ciências e tecnologia, Coimbra, 2016.

PINTO, M. O. (2013) **Fundamentos de energia eólica**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PRIYA, S. (2007). **Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers**. Journal of Electroceramics, vol. 19, n. 1, p. 165–182, 2007.

ROVARIS, S. (2015) **Análise dos usos finais de energia elétrica na produção de frango de corte no oeste do Paraná**. 2015. Disponível em: <<http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/793/1/DissertacaoSollesRovaris.pdf>>. Acesso em: 10/08/2021.

SCARSELLI, G., NICASSIO, F., PINTO, F., CIAMPA, F. IERVOLINO, O., MEO, M. (2016). **A novel bistable energy harvesting concept**. Smart Materials and Structures, vol. 25, n. 5, p.13, 2016.

SILVEIRA, A. S. (2021). **Análise Técnica e Econômica para a implementação de Gerador Eólico Residencial**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Sistemas de Energia) – Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis. p. 91. 2021.

TECNOESSE. **Produtos, exaustor TS-50**. Disponível em: <<https://www.tecnoesse.com.br/>>. Acesso em: 10/08/2021.