

## Utilização da Técnica CFD para Análise da Eficiência Aerodinâmica de Turbina Eólica de Eixo Vertical Empregando Diferentes Valores de Solidez

Luisa Felix de Araujo Souza<sup>1</sup>, Luiz Justino da Silva Junior<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Oeste da Bahia

luisa.s3294@ufob.edu.br, luiz.silva@ufob.edu.br

### RESUMO

A energia eólica se estabeleceu em um cenário global de transição energética diante do esgotamento dos combustíveis fósseis e das mudanças climáticas. À vista disso, a extração de energia cinética do vento é realizada por meio dos aerogeradores ou turbinas eólicas que são classificadas de acordo ao eixo de acionamento mecânico: Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH) e Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV). Quanto ao TEEV, o modelo H-rotor Darrieus ou Darrieus-H se destaca na comunidade científica como o mais eficiente para ambientes urbanos, podendo extrair mais energia do vento por área varrida em relação ao TEEH. Nesta perspectiva, este trabalho utiliza a técnica CFD (Fluidodinâmica Computacional) para analisar em regime transiente o escoamento de ar sobre as pás de uma turbina eólica Darrieus-H de pequeno porte com dimensões baseadas em um modelo real empregando diferentes valores de solidez, para isso, o método adotado é subdividido em etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento. O software ANSYS é utilizado para simular por meio de testes virtuais o modelo escolhido de perfil de aerofólio assimétrico DU-06-W-200 em um domínio computacional bidimensional com regiões estacionárias e rotativas e velocidade do vento de entrada a 6 m/s. Com essa finalidade, o Método dos Volumes Finitos e o modelo de turbulência  $k-\omega$  SST são adotados para obtenção da solução numérica. Posteriormente, são obtidos no pós-processamento da simulação os coeficientes aerodinâmicos de potência que indicarão a configuração geométrica com maior eficiência aerodinâmica através dos parâmetros de solidez e razão de velocidade de ponta de pá.

### Palavras-chaves:

H-rotor Darrieus; Fluidodinâmica Computacional; Turbina Eólica de Pequeno Porte.

### ABSTRACT

Wind energy has established itself in a global scenario of energy transition in the face of the depletion of fossil fuels and climate change. Given this, the extraction of kinetic energy from the wind is carried out by means of wind turbines are classified according to the mechanical drive shaft: Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) and Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). As for VAWT, the H-rotor Darrieus or Darrieus-H model stands out in the scientific community as the most efficient for urban environments, being able to extract more energy from the wind per swept area compared to HAWT. In this perspective, this work uses the CFD (Computational Fluid Dynamics) technique to transiently analyze the airflow over the blades of a small Darrieus-H wind turbine with dimensions based on a real model employing different solidity values. The ANSYS software is used to simulate through virtual tests the chosen model of asymmetric airfoil profile DU-06-W-200 in a two-dimensional computational domain with stationary and rotating regions and input wind speed at 6 m/s. For this purpose, the Finite Volume Method and the  $k-\omega$  SST turbulence model are adopted to obtain the numerical solution. Subsequently, the power coefficients aerodynamic are obtained in the

post-processing of the simulation, which will indicate the geometric configuration with greater aerodynamic efficiency through the solidity parameters and blade tip speed ratio.

**Keywords:**

H-rotor Darrieus; Computational Fluid Dynamics; Small Wind Turbine.

## 1. INTRODUÇÃO

A solução para garantir a segurança energética e redução dos impactos ocasionados pelas alterações climáticas será através da aceleração da transição energética de fontes fósseis para energias renováveis, na qual, a energia eólica se consolida nessa perspectiva de diversificação da matriz energética diante o recurso ilimitado do vento.

Os aerogeradores ou turbinas eólicas podem ser classificadas de acordo a posição do eixo de acionamento mecânico em relação ao solo, desse modo, Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH) e Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV). Atualmente, a TEEH representa o modelo que possui a maioria dos investimentos comerciais devido a sua melhor eficiência energética, por esse motivo, são amplamente utilizadas em parques eólicos em todo o mundo, no entanto, apesar da conscientização pública da importância de utilizar fontes sustentáveis de energia, esse modelo apresenta questões relacionadas a poluição sonora e visual o que o torna incompatível para ambiente urbano (KUMAR et al., 2018).

As turbinas eólicas de eixo vertical são projetadas para captar o vento de baixa intensidade e se adaptar as condições de escoamento turbulento característico das regiões urbanas com as vantagens de operar com baixo ruído, serem esteticamente atraentes e facilmente integradas em edifícios, além do mais, são capazes de extrair mais energia do vento por unidade de área varrida comparada a turbina eólica de eixo horizontal (KUMAR et al., 2018).

Apesar de serem idealizadas para as áreas urbanas, ainda há desafios relacionados a melhoria do desempenho aerodinâmico das turbinas eólicas de eixo vertical. Por esse motivo, ferramentas computacionais são amplamente utilizadas para o desenvolvimento de modelos mais eficientes e de maneira complementar a testes experimentais sendo a fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) uma técnica aplicada para avaliar o comportamento do escoamento do ar sobre as pás eólicas visando melhores coeficientes aerodinâmicos de acordo a variação de parâmetros no projeto, tais como, perfis de aerofólios, solidez e velocidade de ponta de pá.

Nessa perspectiva, o objetivo geral desse trabalho é investigar as melhores configurações de pás de turbinas eólicas de eixo vertical empregando diferentes valores de solidez através da técnica CFD para se obter uma análise de como esse parâmetro influencia a eficiência aerodinâmica.

## 2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL

Apesar das perspectivas favoráveis ao setor eólico, na rede de transmissão e distribuição dos parques eólicos existem perdas significativas de energia reduzindo a oferta de eletricidade aos consumidores finais. Dessa forma, uma alternativa é aplicação de turbinas eólicas de pequeno porte para o abastecimento energético de residências, iluminação pública, pequenos centros de telecomunicações e regiões de difícil acesso à conexão de rede (KC et al., 2019).

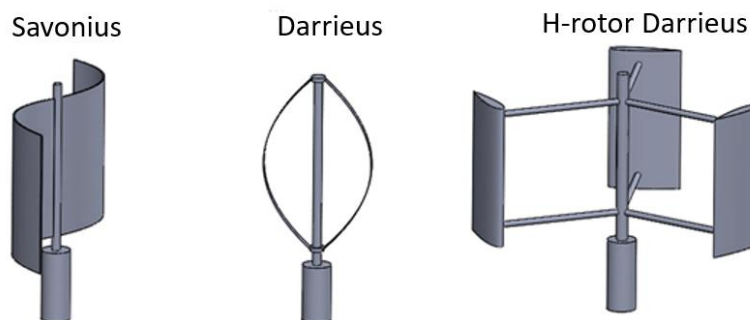
Nas áreas rurais ou no mar, onde ocorre a implementação das grandes turbinas eólicas atualmente, os territórios são abertos e livres de obstáculos, características que influenciam nas condições de vento, sendo estes, constantes e de alta intensidade. Todavia, as condições ambientais nas áreas urbanas e suburbanas são complexas e se constituem de ventos de baixa intensidade e turbulentos devido à presença de construções. Em virtude disso, as turbinas eólicas devem possuir um menor diâmetro do rotor para que não haja interferência com o perfil de velocidade vertical do vento. (KC et al., 2019).

A turbina eólica de eixo vertical tende a ser mais compacta e ocupar menos espaço em comparação com a turbina de eixo horizontal tornando possível a instalação em locais onde o espaço é limitado, como áreas urbanas ou terrenos com restrições de tamanho (KUMAR et al., 2018). A vista disso, A TEEV é classificada em dois grupos principais: Savonius e Darrieus. Respectivamente, a Savonius possui geometria semelhante a um S em virtude ao posicionamento das pás, nas quais existe o predomínio

da força aerodinâmica de arrasto na superfície, além do mais, detém baixa velocidade de corte (KUMAR et al., 2018).

O rotor Darrieus possui geometria diversificada, composta por duas ou três pás com formato curvo ou reto, comprimento de corda constante e baixo custo de construção. O princípio de extração da energia cinética do vento é baseado na força aerodinâmica de sustentação, possui um melhor aproveitamento por área varrida e um maior desempenho, entretanto, para esse modelo é necessário um mecanismo externo de auto partida devido ao baixo torque inicial (KUMAR et al., 2018). Uma variação da turbina Darrieus é H-rotor e os principais modelos de turbinas eólicas de eixo vertical são visualizados conforme a Figura 1.

**Figura 1:** Principais modelos de TEEV.



**Fonte:** Adaptado de Jain e Saha (2020).

Uma das principais vantagens da TEEV é a capacidade de aproveitar o vento proveniente de qualquer direção, o que a torna especialmente útil em áreas com ventos instáveis ou com mudanças frequentes de direção. Além disso, a ausência de mecanismos de guinada simplifica o projeto e a operação da turbina, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade (TJIU et al., 2015; DU et al., 2019).

## 2.2 PARÂMETROS DE PROJETO

O principal parâmetro para a análise da eficiência de uma turbina eólica de eixo vertical é o coeficiente de potência ( $C_p$ ), o qual avalia a eficiência energética do rotor eólico a partir do aproveitamento da potência mecânica extraída pela turbina da quantidade de potência disponível do vento e é dado pela Equação (1) (HANSEN et al., 2021):

$$C_p = \frac{P}{(1/2) \cdot \rho \cdot A \cdot R \cdot U_\infty^3} \quad (1)$$

onde  $P$  é a potência da turbina,  $\rho$  a massa específica do fluido,  $A$  a área varrida pelas pás eólicas,  $R$  o raio do rotor e  $U_\infty$  a velocidade do fluido. (HANSEN et al., 2021).

Além do mais, o coeficiente de potência possui variáveis de influência no desempenho do rotor eólico, sendo estes, o número de Reynolds ( $R_e$ ) do escoamento livre, aerofólio, a razão da velocidade de ponta de pá ( $\lambda$ ) e a solidez da turbina ( $\sigma$ ). Desse modo, o  $C_p$  também pode ser expresso pela Equação (2) (MEANA-FERNÁNDEZ et al., 2018):

$$C_p = f\{R_e, \lambda, \sigma, \text{aerofólio}\} \quad (2)$$

sendo  $\lambda$  dado pela Equação (3) (JAIN e SAHA, 2020):

$$\lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{U_\infty} \quad (3)$$

### 2.2.1 Solidez

A solidez ( $\sigma$ ) é um importante parâmetro para definir a geometria da turbina e sua capacidade de autopartida, ademais, detém influência no desempenho da extração de energia cinética do vento e refere-

se a uma relação entre o número de pás (N), o comprimento de corda do perfil de pá (c) e o raio do rotor eólico (R), para tal, é definida pela Equação (4) (SAGHARICHI et al., 2018):

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{R} \quad (4)$$

## 2.3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A fluidodinâmica computacional (CFD) é uma área de estudos dedicada a análise do comportamento e propriedades de escoamentos de fluidos a partir da simulação numérica, nos quais as características físicas em um regime sem transferência de calor são descritas através das equações de movimento na forma diferencial e são discretizadas em equações algébricas através da aplicação do Método de Volumes Finitos, além disso, para escoamentos turbulentos devido à complexidade são implementados modelos de turbulência nos *softwares* que utilizam a técnica CFD.

### 2.3.1 Equações Governantes

As equações governantes são as equações de movimento na forma diferencial que irão descrever o escoamento de fluido sendo definidas como: a Equação da Continuidade e a Equação de Navier-Stokes. Respectivamente, a primeira descreve o princípio da conservação de massa, para tal, avalia a taxa de variação de massa dentro de um volume de controle (TU et al., 2013) e é dada pela Equação (5):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (5)$$

em que  $\rho$  corresponde a massa específica do fluido,  $t$  o instante de tempo,  $\vec{\nabla}$  o vetor gradiente e  $\vec{V}$  o vetor velocidade nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

A Equação de Navier-Stokes é derivada da 2ª Lei de Newton e descreve a conservação da quantidade de movimento de fluido devido as forças externas de superfície e de corpo (TU et al., 2013) sendo definida pela Equação (6):

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} \right] = -\vec{\nabla} P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (6)$$

em que  $P$  corresponde ao campo de pressão,  $\vec{g}$  o vetor da aceleração da gravidade e  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido.

### 2.3.2 Método dos Volumes Finitos

O método dos volumes finitos (*Finite Volume Method – FVM*) é um método numérico empregado para a discretização das equações governantes na forma diferencial em equações algébricas lineares através da divisão do domínio computacional em um número finito de volumes de controle (elementos), nos quais em cada centroide serão obtidas as soluções numéricas das variáveis dependentes a cada elemento (TU et al., 2013).

Devido a sua característica conservativa, o FVM é método mais aplicado a técnica CFD sendo formulado para malhas estruturadas e não estruturadas, ademais, as condições de contorno são estabelecidas facilmente e detém uma variedade de aplicações envolvendo escoamentos de fluidos, transferência de massa e calor (MOUKALLED et al., 2016).

### 2.3.3 Modelo de Turbulência

No escoamento turbulento existe uma grande faixa de comprimento de vórtices além de altos números de Reynolds em que as forças inerciais são muito maiores do que os efeitos viscosos ocasionando flutuações aleatórias no fluido. Nesse contexto, seria necessário um grande poder

computacional para obtenção da solução numérica por meio da Equação de Navier-Stokes, portanto é fundamental adotar-se um método de obtenção de média das variáveis das equações governantes descartando as oscilações instantâneas (TU et al., 2013).

A abordagem adotada para avaliar o comportamento do fluido devido as flutuações encontradas nas variáveis das equações governantes é o U-RANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) sendo o modelo de turbulência mais adequado o modelo  $\kappa - \omega$  SST visto que detém concordância com os resultados obtidos experimentalmente e se caracteriza como um modelo estável e confiável demonstrando melhor desempenho comparado ao modelo de turbulência avaliado  $\kappa - \epsilon$ , no qual a solução numérica não convergiu e de maneira distinta aos resultados experimentais (BALDUZZI et al., 2016).

## 2.4 MALHA E CAMADA-LIMITE

A malha consiste em uma grade estruturada ou não-estruturada de volumes de controle (elementos finitos) no domínio computacional. Configura-se como a segunda etapa no pré-processamento da fluidodinâmica computacional (CFD) sendo desenvolvida após a criação do modelo geométrico em que será analisado as propriedades físicas do escoamento de fluidos (TU et al., 2013).

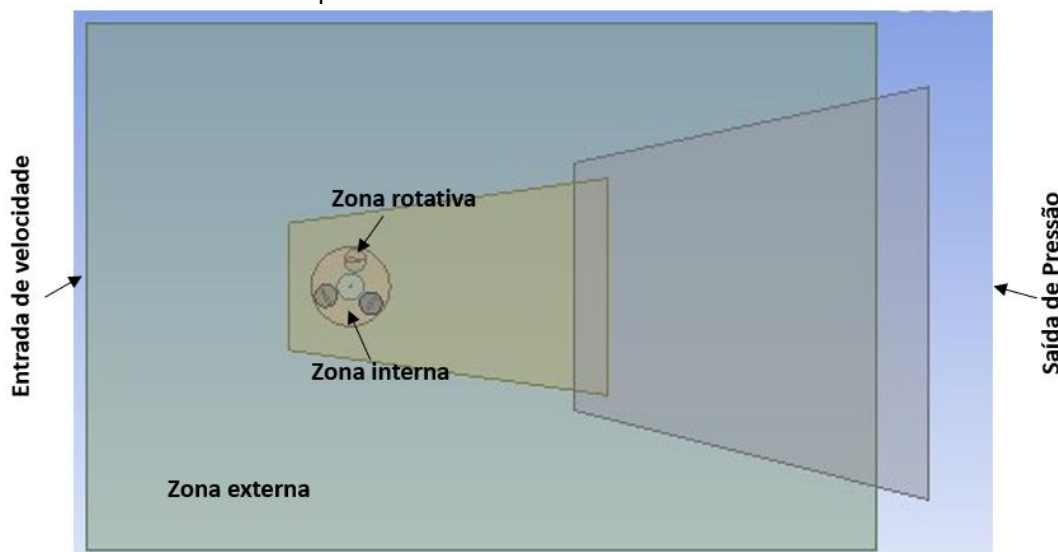
Para a implementação da técnica CFD é importante a divisão em subdomínios menores visto que a precisão da solução numérica é influenciada pela quantidade de elementos na malha. Todavia, essa configuração exige grande poder computacional que influenciam nos custos da simulação sendo necessário a otimização e a escolha de configurações adequadas que possam gerar resultados satisfatórios (TU et al., 2013).

A vista disso, a camada limite é uma região fina próxima as paredes da geometria nas quais os efeitos viscosos são considerados, por esse motivo, é essencial que nessa região seja estabelecida condições que a tornem suficientemente refinadas para a análise do escoamento de fluido. (ÇENGEL et al., 2015).

## 3. MÉTODO DO ESTUDO

Essa metodologia consiste na análise de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus-H através do parâmetro de solidez, para tal, são efetuadas simulações computacionais aplicando-se a técnica CFD por meio do *software* ANSYS FLUENT na versão estudantil. O método adotado para essa análise será subdividido em etapas de pré-processamento, processamento e pós processamento, respetivamente. Para a primeira, têm como embasamento científico os modelos computacionais implementados por Sagharichi et al. (2018) e Zhang et al. (2021). A Figura 2 ilustra o modelo do domínio computacional para a análise do escoamento de ar sobre as pás eólicas e das propriedades do fluido. Adicionalmente, O domínio foi elaborado com base em abordagem de Ahmed e Awais (2022).

**Figura 2:** Modelo do domínio computacional.



Fonte: Autor (2023).

As dimensões da turbina eólica Darrieus-H serão definidas com embasamento no modelo em desenvolvimento no Laboratório Didático de Engenharia Mecânica no campus de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia. A Tabela 1 resume as configurações geométricas aplicadas ao domínio computacional.

**Tabela 1:** Configurações aplicadas ao domínio computacional.

Diâmetro do rotor (m)	0,320
Número de pás	3
Perfil de aerofólio	Du-06-W-200
Corda do perfil de pá (m)	0,104

**Fonte:** Autor (2023).

Todavia, para a análise de solidez as dimensões da corda do perfil da pá eólica irão variar em relação a esse parâmetro para prever a melhor eficiência energética do rotor eólico de acordo a configuração geométrica estabelecida. Essa relação é obtida através da Equação (4) e apresentada pela Tabela 2.

**Tabela 2:** Solidez variando em função da corda do perfil de pá

Solidez	Corda do perfil de pá (m)
1,0	0,053
1,5	0,080
2,0	0,104
2,5	0,131

**Fonte:** Autor (2023).

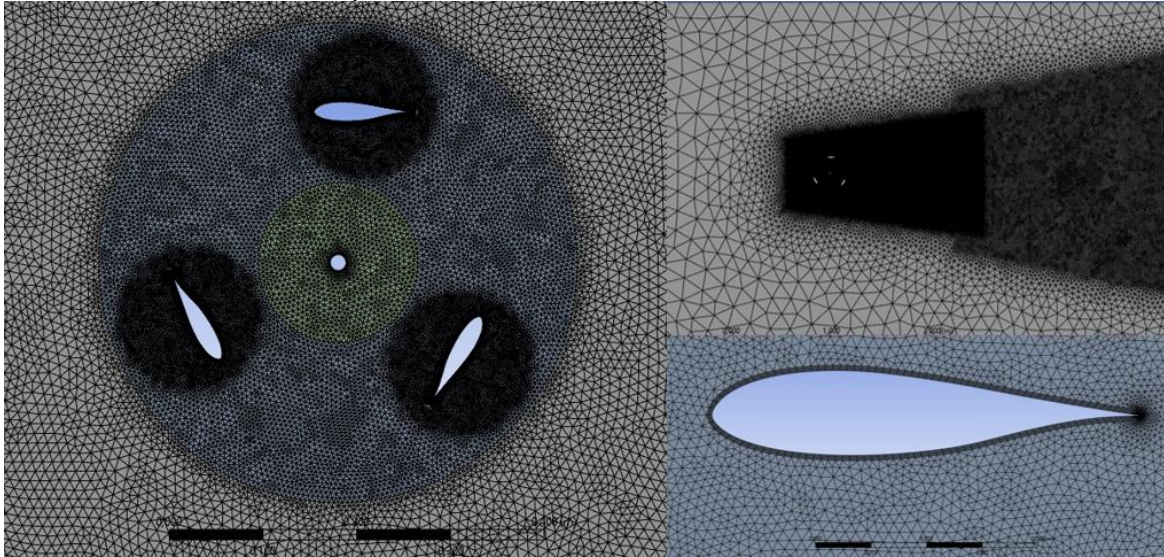
A análise de solidez é uma consideração importante no projeto de turbinas eólicas, pois está relacionada à eficiência energética do rotor. A solidez é definida como a relação entre a área de varredura (área projetada pela rotação das pás) e a área frontal do rotor. Na Tabela 2, são apresentadas as relações entre a solidez e a corda do perfil da pá eólica. Conforme a tabela, diferentes valores de solidez são alcançados variando a corda do perfil da pá (ZHANG et al, 2021).

Para uma solidez de 1, a corda do perfil da pá é de 0,053 m. À medida que a solidez aumenta, a corda também aumenta. A exemplo, para uma solidez de 1,5, a corda é de 0,080 m, para uma solidez de 2, a corda é de 0,104 m, e assim por diante. Essa relação entre solidez e corda do perfil da pá é importante para prever a eficiência energética do rotor eólico. A solidez afeta o desempenho aerodinâmico da turbina, sendo que valores mais altos de solidez geralmente levam a uma maior eficiência, mas também podem aumentar a resistência ao vento (SAGHARICHI et al, 2018).

Portanto, a escolha da corda do perfil da pá deve ser cuidadosamente analisada em relação à solidez desejada, visando otimizar o desempenho da turbina. Essa relação entre solidez e corda do perfil da pá é uma ferramenta importante para ajustar as características aerodinâmicas da turbina eólica, permitindo encontrar a configuração geométrica mais eficiente em termos de geração de energia (ZHANG et al, 2021).

Em seguimento, para a discretização das equações governantes no domínio computacional será desenvolvida a malha de maneira adaptativa para cada região. Em vista disso, para o subdomínio retangular estacionário (zona externa) será gerada uma malha não-estruturada com elementos trapezoidais que serão refinados nas regiões próximas ao rotor eólico e de esteira aerodinâmica com objetivo de diminuir a quantidade de elementos necessários e minimizar a demanda computacional. Assim como, no subdomínio circular rotativo (zona rotativa) será implementado o mesmo padrão de malha, porém com um refinamento ainda maior na camada limite por ser a região próxima à parede do aerofólio. A Figura 3 ilustra a malha criada para o domínio computacional com as configurações descritas.

**Figura 3:** Malha do domínio computacional.



**Fonte:** Autor (2023).

Para a criação da malha do domínio computacional foram utilizados, em média, 97 mil elementos, para tal, a validação da qualidade é obtida por meio do critério denominado *Skewness*, o qual define para esse objetivo um intervalo entre 0 e 1, em que, quanto mais próximo a 0, maior a qualidade. Em vista disso, a malha desenvolvida possui seu critério no valor de 0,0599, sendo assim, possui valor desejável de qualidade.

Após a geração da malha serão estabelecidas as condições de contorno e propriedades do fluido em escoamento por meio do ANSYS FLUENT (versão estudante). Nota-se pela Tabela 3 as configurações de contorno definidas assim como as propriedades do ar.

**Tabela 3:** Condições de contorno e propriedades do ar.

Velocidade do fluido (m/s)	6
Pressão manométrica de Saída (kPa)	0
Massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ )	1,225
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	$1,7894 \cdot 10^{-5}$

**Fonte:** Autor (2023).

Na simulação computacional da turbina eólica, é necessário definir as condições de contorno e as propriedades do ar para obter resultados precisos. A Tabela 3 apresenta as configurações de contorno e as propriedades do ar definidas para o estudo. A velocidade do fluido é especificada como 6 m/s. Essa velocidade representa a velocidade do vento incidente na turbina eólica. É um parâmetro importante, pois influencia diretamente o desempenho e a geração de energia da turbina. Uma velocidade de 6 m/s é uma condição típica para análises e simulações de turbinas eólicas (ZHANG et al, 2021).

A pressão manométrica de saída é definida como 0 kPa. Essa condição de contorno representa uma saída de pressão, onde o ar deixa o domínio computacional. A pressão manométrica de 0 kPa indica que não há restrição ou contrapressão no ponto de saída (SAGHARICHI et al, 2018).

As propriedades do ar são especificadas como massa específica de 1,225  $\text{kg/m}^3$  e viscosidade dinâmica de  $1,7894 \times 10^{-5}$  Pa.s. Essas propriedades são essenciais para modelar o comportamento do ar dentro do domínio da simulação. A massa específica está relacionada à densidade do ar, enquanto a viscosidade dinâmica representa a resistência do ar ao fluxo (SAGHARICHI et al, 2018).

Ao definir essas condições de contorno e propriedades do ar, é possível realizar a simulação computacional e obter informações sobre o comportamento do fluxo de ar ao redor da turbina eólica. Esses dados são cruciais para avaliar o desempenho aerodinâmico da turbina, incluindo a eficiência de geração de energia e outros parâmetros relevantes (ZHANG et al, 2021).

### 3.1 PROCESSAMENTO

A princípio, serão definidas as configurações que serão adotadas para a obtenção da solução numérica. Em vista disso, deverá ser realizada uma pré análise com um regime permanente nas zonas de células denominado *Moving Frame of Reference* para a verificação da convergência da solução numérica. Com essa confirmação, o escoamento deverá ser novamente configurado para um regime transiente através do *Sliding Mesh Feature* que consiste em um método mais preciso para simular fluxos rotativos e pode descrever corretamente o regime que varia em função do tempo.

A solução numérica é resolvida através de métodos baseados na densidade ou na pressão. No entanto, os efeitos da compressibilidade são quase nulos devido aos baixos valores do número de Mach no escoamento, somado a isso, a abordagem por meio da densidade exige resíduos muito baixos e passos angulares muito curtos para ser preciso, tornando essa abordagem não vantajosa para a análise da turbina eólica Darrieus-H, desse modo, será utilizado o modelo baseado na pressão que possui maior estabilidade e convergência mais rápida (BALDUZZI et al., 2016).

Em sequência, o algoritmo para resolver o esquema de acoplamento pressão-velocidade será o SIMPLE – *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations* e o modelo de turbulência escolhido será o  $k - \omega - SST$ , ambos são utilizados por Balduzzi et al. (2016) e Zhang et al (2021) sendo que o modelo de turbulência detém estabilidade e confiabilidade nos resultados encontrados estando de acordo as testes experimentais conforme os pesquisadores.

No que tange ao critério de convergência da solução entre as iterações, está é estimada em um valor residual de  $1.10^{-6}$  como utilizado por Zhang et al (2021). Essa definição é importante para a inicialização do cálculo e obtenção de uma solução numérica precisa.

### 3.2 PÓS-PROCESSAMENTO

Após a obtenção da solução numérica na etapa de processamento, serão obtidos no pós-processamento os coeficientes de potência médio para uma faixa de velocidade de ponta de pá ( $\lambda$ ) que variará de 1 a 2,5 com intervalos de 0,5. Após isso, será analisado qual configuração geométrica oferece a melhor eficiência aerodinâmica avaliando o critério de solidez.

Para tal finalidade, é criado um parâmetro no *software* que representa a velocidade angular na região rotativa em função da faixa da razão da velocidade de ponta de pá (TSR) escolhida para análise conforme visualizado pela Tabela 4. Somado a isso, o passo angular do rotor eólico foi parametrizado para corresponder a variação da velocidade angular.

**Tabela 4:** Velocidade angular da região rotativa em função do TSR.

TSR	Velocidade angular (rad/s)	Passo de tempo Angular
1,0	37,5	0,0004654
1,5	56,25	0,0003103
2,0	75	0,0002327
2,5	93,75	0,0001862

**Fonte:** Autor (2023).

Além disso, também serão obtidos os contornos de velocidade e pressão do escoamento de ar em regime transiente para verificação dos fenômenos físicos nas regiões do domínio computacional e em torno das pás eólicas, tais como, as regiões de baixa e alta pressão.

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

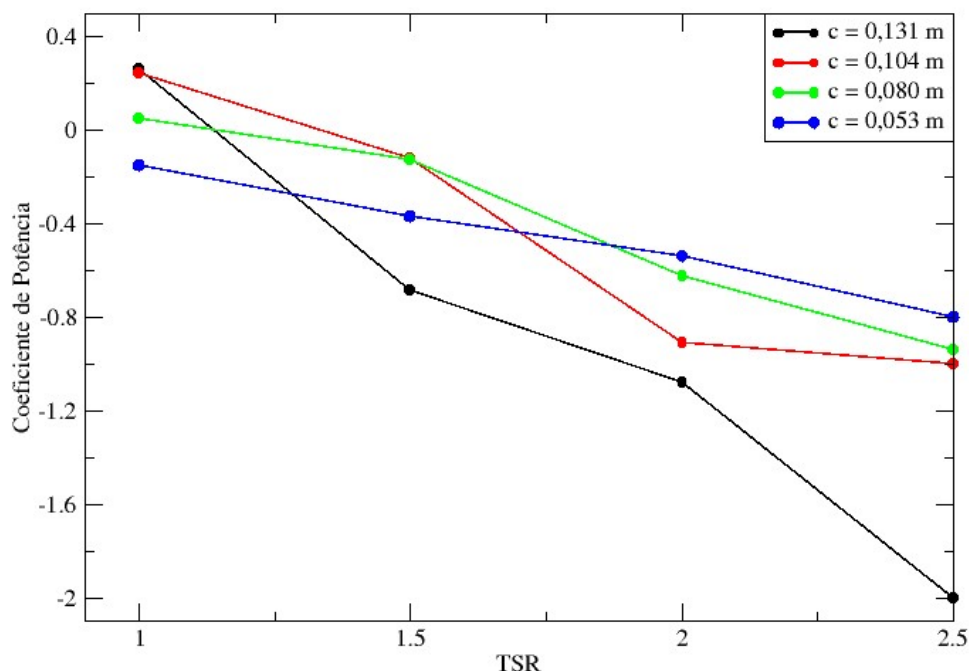
### 4.1 COEFICIENTE DE POTÊNCIA

Após convergência da solução numérica, são calculados os coeficientes de potência médio para cada comprimento de corda do perfil de pá ( $c$ ) estudado em função da variação da razão da velocidade de ponta de pá (TSR). O coeficiente de potência possibilita a avaliação da eficiência aerodinâmica da



turbina eólica em relação ao aproveitamento da energia cinética do vento sendo os resultados obtidos ilustrados de forma gráfica pela Figura 4.

**Figura 4:** Coeficiente de potência médio em função do TSR.



**Fonte:** Autor (2023).

É observado no gráfico da Figura 4 que os coeficientes de potência máximos para os comprimentos de corda de perfil de pá são atingidos com razão de velocidade de ponta de pá igual a 1, e para valores maiores dessa razão, é notado que os coeficientes de potência diminuem até atingirem seu valor mínimo em 2,5. Ademais, constata-se que para TSR igual a 1 os coeficientes de potência aumentam de maneira proporcional aos comprimentos de corda de perfil de pá, sendo assim, o maior valor, equivalente à 0,26079, é atingido para o comprimento igual a 0,131 m.

Em seguimento, para TSR igual a 1,5, é percebido parcialmente a alteração dessa proporcionalidade, pois c igual a 0,131 m detém o menor coeficiente de potência de -0,68498. A partir do TSR igual a 2, sucede-se uma inversão de proporcionalidade, uma vez que, nesse instante os maiores valores dos coeficientes de potência são alcançados à proporção que os comprimentos de corda de perfil de pá diminuem, nessa condição, para c igual a 0,053 m e  $C_p$  igual a -0,53739.

Esse efeito é ocasionado devido a solidez da turbina eólica Darrieus-H, visto que, maiores comprimentos de perfil de corda possuem maior solidez e conforme também constatado por Du et al. (2019) e Ghaseminian et al. (2017) terão uma melhor eficiência aerodinâmica para menores valores de razão velocidade de ponta de pá. No entanto, com o aumento do TSR ocorre a diminuição do desempenho de maneira rápida como observado por Du et al. (2019) e Ghaseminian et al. (2017).

Além do mais, para menores comprimentos de corda de perfil de pá, sendo assim, menor solidez, nota-se pelo gráfico da Figura 4 que há uma menor variação dos valores entre os coeficientes de potência na faixa da razão da velocidade de ponta de pá e detém melhor eficiência para maiores valores dessa razão comparados com os perfis de maior comprimento de corda que também foi observado por Du et al (2019).

Apesar disso, para as menores solidezs nessa análise de 1 e 1,5 que correspondem respectivamente aos comprimentos de corda de perfil de pá igual a 0,053m e 0,080 m, ainda assim, essas não atingem performance suficiente para ser viabilizado a um projeto eólico de microgeração, pois a turbina eólica é projetada para operar em máxima eficiência aerodinâmica. Em síntese, os melhores resultados para cada comprimento de corda de perfil de pá podem ser visualizados conforme a Tabela 5.

**Tabela 5:** Coeficiente de potência máximo em relação a solidez.

Comprimento de corda (m)	Coeficiente de Potência	Solidez
0,053	-0,15168	1,0
0,080	0,04994	1,5
0,104	0,24302	2,0
0,131	0,26079	2,5

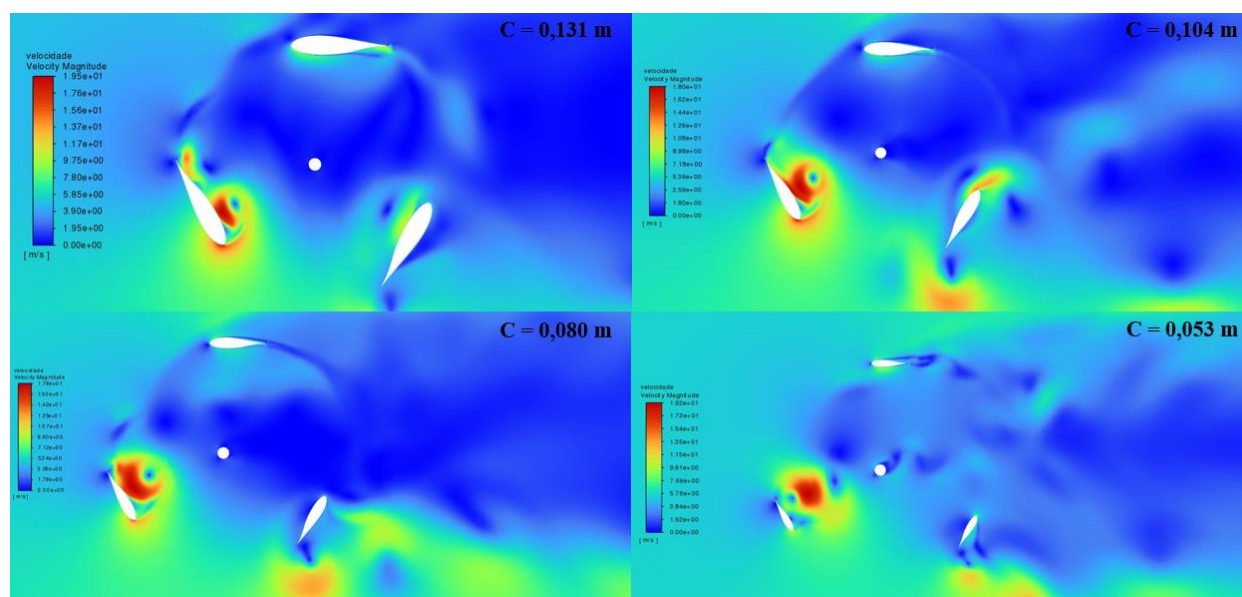
**Fonte:** Autor (2023).

#### 4.2 CONTORNOS DE VELOCIDADE E PRESSÃO

Os contornos de velocidade e pressão descrevem o comportamento do escoamento do fluido sobre as pás eólicas em um regime transiente. Para tal análise, serão abordadas as configurações geométricas do rotor eólico com as melhores eficiências aerodinâmicas apresentadas na Tabela 5 da seção anterior, nesse caso, para o TSR igual a 1.

A escala de cores adotada para visualização dos contornos que serão avaliados consiste em cores mais intensas com tonalidade avermelhada para os valores máximos e menos intensas com tonalidade azulada para os valores mínimos. Assim como, as pás estarão dispostas em posições azimutais de 0°, 120° e 240° tendo como referência geométrica a pá superior do rotor eólico no sentido anti-horário. Os contornos de velocidade do escoamento de fluido que representam os comprimentos de corda descritos são observados pela Figura 5.

**Figura 5:** Contorno de velocidade para os comprimentos de corda de perfil de pá.



**Fonte:** Autor (2023).

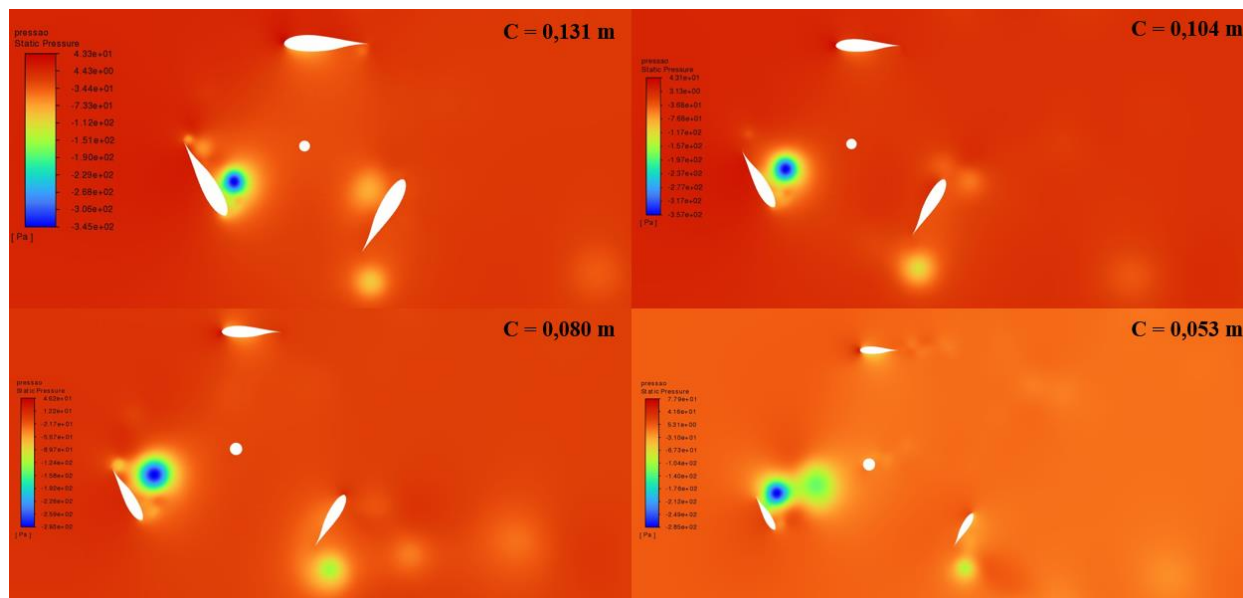
É observado nos contornos de velocidade representados o comportamento característico de um rotor eólico, que compõe de regiões de escoamento de fluido com velocidade nula ou mínima no eixo principal do rotor e na região de esteira, sendo assim, na parte traseira do rotor que se estende ao longo do domínio computacional.

Analisando a região ao redor das pás eólicas, nota-se que na posição azimutal de 0° o escoamento de fluido incide com menor intensidade comparado a 120°, este por sua vez, detém maiores velocidades devido ao ângulo de ataque ser mais elevado em decorrência da força aerodinâmica de sustentação. Além disso, percebe-se pelas escalas dos contornos das Figuras 19, 20, 21 e 22 que a maior velocidade entre

os comprimentos de perfil de corda estudados é atingida pelo comprimento igual a 0,131 m alcançando velocidade máxima de 19,5 m/s.

Adicionalmente ao entendimento da ação da força aerodinâmica de sustentação, está surge em consequência ao diferencial de pressão sobre as pás eólicas. Os contornos de pressão do escoamento de fluido que representam os comprimentos de corda descritos são observados pela Figura 6.

**Figura 6:** Contorno de pressão para os comprimentos de corda de perfil de pá.



**Fonte:** Autor (2023).

Os contornos de pressão apresentados evidenciam regiões de alta pressão no extradorso das pás eólicas, assim como, regiões com menores pressão na região do intradorso. Esse diferencial de pressão impulsiona a pá eólica para cima e conseqüentemente uma maior força de sustentação que ocasiona o movimento do rotor eólico como também observado por Balduzzi et al. (2016). Dessa forma, demonstra coerência aos efeitos esperados.

Ademais, é visualizado que à proporção que os comprimentos de corda diminuem uma zona circular de baixa pressão localizada no intradorso da pá estende-se ao bordo de fuga e aumenta de tamanho resultando em uma maior força de arrasto que tem sentido contrário ao movimento, logo, uma maior resistência a este e menores velocidades serão alcançadas. Essa análise demonstra o porquê que os menores comprimentos de corda de perfil de pá para o TSR igual a 1 detiveram a menor eficiência energética como abordado pela Tabela 5.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O setor de energia eólica vem crescendo nos últimos anos no país, no qual o estado da Bahia destaca-se em geração de energia eólica. Nesse sentido, tem-se perspectivas favoráveis para maiores investimentos financeiros e intelectuais no desenvolvimento de tecnologia. A vista disso, há relevância a esse trabalho que se propôs a analisar as características geométricas e modelar computacionalmente uma turbina eólica de eixo vertical Darrieus-H com perfil de aerofólio DU-06-W-200, além de obter os coeficientes de potência com objetivo de investigar o parâmetro da solidez. Por esse motivo, conclui-se que esse trabalho foi satisfatório pois os objetivos foram atingidos.

Nesse trabalho foi constatado que a melhor eficiência aerodinâmica de 26,08% foi alcançada para o comprimento de corda de perfil de pá de 0,131 m com solidez de 2,5 e TSR de 1. Todavia, o comprimento de corda de 0,104 com solidez de 2 e TSR de 1, apresentou eficiência de 24,30% o que torna ambas a cordas de perfil de pá nas condições descritas com características interessantes para estudos mais aprofundados que viabilizem futuros projetos eólicos de microgeração. Entretanto, sugere-se a análise com menores comprimentos de corda e maiores velocidades de ponta de pá para verificar se nessa configuração a um melhor desempenho do rotor eólico.

Outro fator de influência nos resultados, será a utilização de uma máquina com melhor processador para ser possível a execução de maior quantidade de revoluções para o modelo de convergência a cada configuração geométrica que nessa análise consistiu em cinco revoluções. Ademais, a utilização do *software* ANSYS FLUENT em uma versão não estudantil, pois está não haverá limitação de elementos de malha e poderá gerar resultados mais próximos a realidade. Com isso, essa análise pode ser utilizada como base para trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

AHMADI-BALOUTAKI, M. CARRIVEAU, R; TING, D.S-K. Straight-bladed vertical axis wind turbine rotor design guide based on aerodynamic performance and loading analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 228, 742 – 759, 2014.

AHMED, S.; AWAIS, M. M. **CFD analysis of 2D H-Type Darrieus Turbine (VAWT)**. 2022. Disponível em: <<https://www.udemy.com/course/cfd-analysis-of-2d-darrius-turbine-vawt-using-ansys-fluent/>>. Acesso em: 07 de julho de 2023.

BALDUZZI, F. et al. Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. *Renewable Energy*, v. 85, p. 419-435, 2016.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos**. Grupo A, 2015. E-book. ISBN 9788580554915. 2022.

DU, L; GRANT, I; DOMINY, R.G. A review of H-Darrieus wind turbine aerodynamic research. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, v. 233, p. 23–24, 2019.

DURGA, C.P; MISHRA, D.P. CFD simulations for the selection of an appropriate blade profile for improving energy efficiency in axial flow mine ventilation fans. *Journal of Sustainable Mining*, 13 (1), p. 15-21, 2014.

GHASEMIAN, M; ASHRAFI, N; SEDAGHAT, A; A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management*. v.149, p. 87-100, 2017.

HANSEN, J. T.; MAHAK, M.; TZANAKIS, I. Numerical modelling and optimization of vertical axis wind turbine pairs: A scale up approach. *Renewable Energy*, v.171, p. 1371-1381, 2021.

JAIN, S.; SAHA, U. K. The State-of-the-Art Technology of H-Type Darrieus Wind Turbine Rotors. ASME. *Journal of Energy Resources Technology*. v.142, 2020.

KC, A; WHALE, J; URMEE, T. Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: **A review**. *Renewable Energy*, v.131, p. 268-283, 2019.

KUMAR, R.; RAAHEMIFAS, K.; FUNG, A.S. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.89, p. 281-291, 2018.

MEANA-FERNÁNDEZ, A. et al. Parametrical evaluation of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines for the proposal of optimized designs. *Energy*. v.147, p 504-517, 2018.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L; DARWISH, M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. An Advanced Introduction with OpenFOAM. ® and Matlab.* Switzerland: **Springer International Publishing**. v.113, 2016.

SAGHARICHI, A; ZAMANI, M. GHASEMI, A. Effect of solidity on the performance of variable-pitch vertical axis wind turbine. **Energy**. v.161, p. 753-775, 2018.

TJIU, W; MARNOTO, T; MAT, S; RUSLAN, M.H; SOPIAN, K. Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations. **Renewable Energy**. v.75, p. 50-67, 2015.

TU, J; YEOH, G.H; LIU, C. *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. 2 ed. Butterworth-Heinemann, 2013.

ZHANG, L. et al. Influences of trailing edge split flap on the aerodynamic performance of vertical axis wind turbine. **Energy Science & Engineering**, v.9, p. 101-115, 2021.

ZHU, H et al. Numerical study of effect of solidity on vertical axis wind turbine with Gurney flap. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 186 186, p. 17-31, 2019.