



**INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS  
PÁS NA GERAÇÃO DE TORQUE DE TURBINAS  
H-DARRIEUS**

**Ramiro de Matos Bertolina**

**Dissertação de Mestrado  
Ciências Mecânicas**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**Faculdade de Tecnologia**

**Departamento de Engenharia Mecânica**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS PÁS  
NA GERAÇÃO DE TORQUE DE TURBINAS  
H-DARRIEUS

Ramiro de Matos Bertolina

Orientadora: Taygoara Felamingo de Oliveira, Dr.  
Univ (LEA/ENM/UnB)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PUBLICAÇÃO: ENM.DM - XXX.XXX

BRASÍLIA/DF: 6 de novembro de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS PÁS  
NA GERAÇÃO DE TORQUE DE TURBINAS  
H-DARRIEUS

Ramiro de Matos Bertolina

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLO-  
GIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUI-  
SITOS PARCIAIS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS MECÂNICAS.

APROVADA POR:

---

Taygoara Felamingo de Oliveira, Dr. Univ (LEA/ENM/UnB)  
(Orientador)

---

Rafael Castilho Faria Mendes, Dr.Univ (LEA/FGA/UnB)  
(Examinador Interno)

---

Bruno Carmo, Dr.Univ (NDF/USP)  
(Examinador Externo)

---

Mario Siqueira, Dr. Univ (LEA/ENM/UnB)  
(Examinador Suplente)

BRASÍLIA/DF, 6 DE NOVEMBRO DE 2023.

## FICHA CATALOGRÁFICA

Bertolina R.M.  
INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS PÁS NA GERAÇÃO DE TORQUE  
DE TURBINAS H-DARRIEUS

[Distrito Federal] 2023.

xvii, 84p. (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2023.

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

Palavras-chave:

- |   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. Turbina Eólica de Eixo Vertical (VAWT) | 2. Ângulo de Inclinação   |
| 3. Interação Aerodinâmica                 | 4. Esteira de Vorticidade |
| 5. Estol Dinâmico                         |                           |
| I. ENM/FT/UnB                             | II. Título (série)        |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Bertolina R.M.(2023). INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS PÁS NA GERAÇÃO DE TORQUE DE TURBINAS H-DARRIEUS. Dissertação de Mestrado, Publicação ENM.DM - XXX.XXX, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, xvii, 84p.

## CESSÃO DE DIREITOS

**NOME DO AUTOR:** Ramiro de Matos Bertolina.

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO:** INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS PÁS NA GERAÇÃO DE TORQUE DE TURBINAS H-DARRIEUS.

**GRAU / ANO:** MESTRE / 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Ramiro de Matos Bertolina

*Dedico esse trabalho a todos que contribuíram de alguma forma na minha construção profissional. Agradecimento especial aos meus pais, Kleber e Angelina, minha irmã, Danielle, e a minha namorada, Jéssica.*

# Agradecimentos

Ao meu pai, minha mãe e minha irmã, pelo carinho e apoio durante essa difícil jornada.

À minha namorada, Jéssica, pela paciência, amor e carinho.

Ao meu orientador, professor Taygoara, pela disponibilidade, paciência e orientação.

Ao professor Brasil pela sua atenção e colaboração.

Ao professor Rafael pelo suporte computacional e acadêmico.

Aos meus colegas de laboratório Matheus, Arthur, Reginaldo, Raysa, Rogério, Jackson, Dário, Nicolás e Matheus Neves pelo bons momentos vividos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

# Abstract

## INFLUENCE OF BLADE PITCH ANGLE ON TORQUE GENERATION IN H-DARRIEUS TURBINES

**Author:** Ramiro de Matos Bertolina Ramiro de Matos Bertolina

**Supervisor:** Taygoara Felamingo de OliveiraTaygoara Felamingo de Oliveira, Dr. Univ (LEA/ENM/UnB)

**Graduate Program in Mechanical Sciences**

**Brasília, 2023**

With the growing interest in wind energy in urban environments, vertical axis turbines are gaining prominence due to their low cost of installation and maintenance and their ability to operate in regions with constantly changing winds. However, these devices still face challenges in terms of their power coefficient, which is relatively low compared to horizontal axis turbines. One of the current lines of research to improve the performance of these turbines is the study of the pitch angle of their blades. The state of the art indicates an improvement in the power coefficient of up to about 10% by changing the pitch angle. This increase is attributed to the delay in the release of the dynamic stall vortex of the blades. However, in vertical axis turbines, each blade creates an individual wake. During turbine operation, the wake of one blade interacts with another blade. This interaction affects its torque production, a phenomenon that has not been explored in the literature for vertical axis turbines. This research focuses on the modification that varying the pitch

angle causes in the interactions between the wake and the blades of an H-Darrieus turbine made with a NACA 0022 aerodynamic profile, with a chord of 0.1 m and a height of 0.4 m. It also analyzes how the blade interacts with the wake. In addition, it is analyzed how varying the pitch angle changes the dynamic stall phenomenon in the blades. To study these phenomena, URANS type numerical analyses have been performed using the  $\kappa - \omega$  SST turbulence model. In addition, the study includes theoretical approaches based on aerodynamic force data obtained using the panel method. The analyses have been carried out using configurations that include both three blades and a single blade. These multiple configurations make it possible to evaluate the differences between blade passage with and without wake interaction. The analysis of the wake interaction leads to the conclusion that changing the angle of inclination causes an increase in the incidence of the boundary layer separation phenomenon and displaces the vortex that detaches from the blades, changing the way it impacts the downstream blade. Applying these findings to a study of the tilt angle of the turbine, this research shows that changing the tilt angle to  $-5^\circ$  causes a 22% increase in the power coefficient of the turbine, 12% higher than that reported in the literature.

**Keywords:** Vertical Axis Wind Turbine (VAWT); Pitch Angle; Aerodynamic Interaction; Vorticity Wake; Dynamic Stall.

# Resumo

## INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS PÁS NA GERAÇÃO DE TORQUE DE TURBINAS H-DARRIEUS

**Autor:** Ramiro de Matos Bertolina

**Orientador:** Taygoara Felamingo de Oliveira, Dr. Univ (LEA/ENM/UnB)

**Programa de Pós Graduação em Ciências Mecânicas**

**Brasília, 6 de novembro de 2023**

Com o crescente interesse na energia eólica em ambientes urbanos, as turbinas de eixo vertical ganham destaque devido à sua instalação e manutenção economicamente vantajosas e a sua capacidade de operar em regiões com ventos em constante mudança de direção. No entanto, esses dispositivos ainda enfrentam desafios em relação o seu coeficiente de potência, que é relativamente baixo em comparação com as turbinas de eixo horizontal. Uma das linhas de pesquisa atuais para melhorar o desempenho dessas turbinas é o estudo do ângulo de inclinação de suas pás. O estado da arte aponta uma melhora de até aproximadamente 10% no coeficiente de potência através de alterações do ângulo de inclinação. Esse aumento é atribuído ao atraso na liberação do vórtice de estol dinâmico das pás. No entanto, em turbinas de eixo vertical cada pá produz uma esteira individual. Durante a operação da turbina, a esteira de uma pá interage com outra pá. Essa interação afeta a sua produção de torque, fenômeno este ainda inexplorado na literatura para turbinas de eixo vertical. A presente pesquisa concentra-se na modificação que a variação

do ângulo de inclinação causa nas interações entre esteira e pás de uma turbina H-Darrieus, que é feita com perfil aerodinâmico NACA 0022, com uma corda de 0,1 m e uma altura de 0,4 m. Além disso, é analisado como a variação do ângulo de inclinação altera o fenômeno de estol dinâmico nas pás. Para estudar estes fenômenos, foram feitas análises numéricas do tipo URANS, utilizando o modelo de turbulência  $\kappa - \omega$  SST. Além disso, o estudo incorpora abordagens teóricas com base em dados de forças aerodinâmicas obtidos através do método dos painéis. As análises foram realizadas abrangendo configurações que incluem tanto três pás quanto uma única pá. Estas múltiplas configurações permitem avaliar as diferenças entre a passagem de pá com e sem a interação de esteiras. A análise da interação entre esteiras permite concluir que a alteração do ângulo de inclinação causa um aumento na incidência do fenômeno de separação da camada limite e desloca o vórtice que se desprende das pás, mudando a forma com que o mesmo impacta a pá passando pela jusante. Aplicando essas descobertas durante um estudo do ângulo de inclinação da turbina, a presente pesquisa revela que a modificação do ângulo de inclinação para  $-5^\circ$  ocasiona um aumento de 22% no coeficiente de potência da turbina, 12% acima do reportado pela literatura.

**Palavras-chaves:** Turbina Eólica de Eixo Vertical (VAWT); Ângulo de Inclinação; Interação Aerodinâmica; Esteira de Vorticidade; Estol Dinâmico.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
1.1	Contextualização e Motivação	2
1.2	Revisão da literatura	10
1.3	Definição do problema e objetivos	16
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA NUMÉRICA</b>	<b>18</b>
2.1	Domínio computacional e condições de contorno	22
2.2	Avaliação do modelo de turbulência	23
2.3	Estudo de convergência de malha	25
2.4	Efeito do incremento azimutal	28
2.5	Simulação da turbina com uma pá	29
<b>3</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>30</b>
3.1	Influência do ângulo de inclinação nas interações aerodinâmicas	31
3.2	Avaliação do torque comparando a análise analítica e numérica para a turbina de três e uma pá	41
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>47</b>

<b>APÊNDICES</b>	<b>53</b>
<b>APÊNDICE A – METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DO TORQUE TEÓRICO . . . . .</b>	<b>54</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1 – Tipos de VAWTs. (a) Arrasto; (b) Sustentação. Adaptado de Hau (2013). . . . .	4
Figura 1.2 – Perfil em condição de estol dinâmico. I- Início da separação da camada limite no bordo de ataque; II- Desenvolvimento de um vórtice no bordo de ataque; III- Liberação do vórtice no bordo de ataque e formação de um vórtice no bordo de fuga; IV- Liberação do vórtice do bordo de fuga. Adaptado de (LARSEN; NIELSEN; KRENK, 2007). . . . .	6
Figura 1.3 – Ilustração esquemática do campo de vorticidade, com desprendimento do vórtice de estol dinâmico. (—) Vórtice no sentido anti-horário; (—) Vórtice no sentido horário. . . . .	7
Figura 1.4 – Dispositivos utilizados para aumentar a eficiência da turbina. (a) Paredes guias. Adaptado de Ansaf et al. (2023); (b) Estator. Adaptado de Wilberforce e Alaswad (2023); (c) Defletor. Adaptado de Zidane et al. (2023); (d) Difusor. . . . .	9
Figura 1.5 – Modificações na pá para aumentar a eficiência da turbina. (a) Slot; (b) Aba de Gurney; (c) Winglet. Adaptado de Zhang et al. (2019); (d) Variação do ângulo de inclinação. . . . .	10

Figura 1.6 – Turbina H-Darrieus e parâmetros do problema. A turbina opera em um escoamento não perturbado na direção $x$ ( $V_\infty$ ), com uma rotação na direção $z$ ( $\omega$ ) e a variação do ângulo de inclinação ( $\beta$ ), que é o parâmetro de interesse do problema. Adaptado de Hau (2013). . . . .	17
Figura 2.1 – Domínios usados para a geração da malha. A região cilíndrica representa o domínio rotativo e o prisma externo representa a região não rotativa. . . . .	22
Figura 2.2 – Condições de contorno aplicadas na simulação numérica, sendo a região <i>inlet</i> a seção de entrada do escoamento e a <i>outlet</i> a seção saída . . . . .	23
Figura 2.3 – Vorticidade na direção $z$ no plano $XY$ para diferentes posições azimutais ( $\theta$ ) usando vários modelos de turbulência. A pá I está sempre localizada em uma posição azimutal de $0^\circ$ . (a) RNG $k-\epsilon$ ; (b) Standard $k-\epsilon$ ; (c) SST $k-\omega$ . O vórtice de estol dinâmico é destacado na região marcada com a letra V. . . . .	24
Figura 2.4 – Representação da malha na parede da pá da turbina. . . . .	26
Figura 2.5 – Refinamento da malha nos domínios com aplicação de elementos prismáticos ao redor pás (Inflation). . . . .	27
Figura 2.6 – Refinamento da malha nos domínios com inflation aplicado à turbina com uma pá. . . . .	29
Figura 3.1 – Gráfico mostra a curva de torque da turbina para cada iteração. (—) região com período transiente; (—) região com período permanente. . . . .	31
Figura 3.2 – Gráfico com comparação dos valores de torque de uma pá para cada posição azimutal durante uma rotação da turbina com inclinação de $0^\circ$ e $-5^\circ$ . (—) torque de uma pá com inclinação de $0^\circ$ ; (—) torque de uma pá com inclinação de $-5^\circ$ . . . . .	32
Figura 3.3 – Plano $XY$ utilizado para análise dos resultados. . . . .	33
Figura 3.4 – Campo de vorticidade na direção $z$ na posição azimutal $99^\circ$ . (a) inclinação $0^\circ$ ; (b) inclinação $-5^\circ$ . . . . .	34
Figura 3.5 – Campo de pressão na posição azimutal $99^\circ$ . (a) Inclinação $0^\circ$ ; (b) Inclinação $-5^\circ$ . . . . .	35

Figura 3.6 – Comparação da espessura da camada limite para para ângulos azimutais em que o torque é nulo (final da seção primária) e pontos de inflexão após a seção primária. . . . .	36
Figura 3.7 – Campo de vorticidade na direção $z$ na posição azimutal $205^\circ$ . (a) inclinação $0^\circ$ ; (b) inclinação $-5^\circ$ . . . . .	37
Figura 3.8 – Representação da tensão de cisalhamento na parede da pá em vetores, lado esquerdo, linhas de corrente, que representam a velocidade, tendo como referencial o observador acompanhando a pá, lado direito. Para região do extradorso. Na posição azimutal $205^\circ$ . (a) inclinação de $0^\circ$ ; (b) inclinação de $-5^\circ$ . . . . .	38
Figura 3.9 – Comparação dos contornos de vorticidade para pá de referência, na posição azimutal de $240^\circ$ , para as inclinações de $0^\circ$ ,(a), e $-5^\circ$ , (b). No segundo pico da seção secundária. . . . .	40
Figura 3.10–Gráfico que representa curva de torque na pá 1 para uma rotação da turbina com ângulo de inclinação igual á $0^\circ$ .(—) Simulação com as três pás; (---) Simulação com uma pá; (●) Pontos de divergência entre as curvas. . . . .	41
Figura 3.11–Campo de vorticidade na direção $z$ na posição azimutal de $18^\circ$ para a turbina com ângulo de inclinação de $0^\circ$ . (a) Simulação com três pás; (b) Simulação com uma pá. . . . .	42
Figura 3.12–Campo de pressão ao redor dos aerofólios na posição azimutal de $18^\circ$ . Para as pás com ângulo de inclinação de $0^\circ$ . (a) Simulação com três pás; (b) Simulação com uma pá. . . . .	43
Figura 3.13–Campo de velocidade na direção $x$ na posição azimutal $205^\circ$ . Para as pás com ângulo de inclinação de $0^\circ$ . (a) Simulação com três pás; (b) Simulação com uma pá. . . . .	44
Figura A.1–Curva polar $C_l \times \alpha$ . . . . .	55
Figura A.2–Representação esquemática de uma pá com três diferentes ângulos de inclinação: positivo,negativo e zero. . . . .	57

Figura A.3–Gráficos mostra a relação entre o torque, ângulo de ataque e a posição azimutal da pá para os ângulos de inclinação de  $-5^\circ$  e  $0^\circ$ .(---) torque de uma pá para inclinação de  $-5^\circ$ . (---) ângulo de ataque da pá para inclinação de  $-5^\circ$ . (—) torque de uma pá para inclinação de  $0^\circ$ . (—) ângulo de ataque da pá para inclinação de  $0^\circ$ . . . . . 59

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dados da turbina . . . . .	16
Tabela 2 – Especificações computacionais. . . . .	22
Tabela 3 – Comparação dos modelos de turbulência $k$ - $\epsilon$ , RNG $k$ - $\epsilon$ e SST $k$ - $\omega$ com os valores encontrados por (HOWELL et al., 2010) para um $TSR$ de 1.87. Os valores mostram o coeficiente de desempenho.	25
Tabela 4 – Estudo de convergência de malha. . . . .	28

# Lista de Símbolos

## Símbolos latinos

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidades</i>
$A$	Área	$\text{m}^2$
$c$	Corda do perfil aerodinâmico	m
$C_p$	Coefficiente de potência	
$C_l$	Coefficiente de sustentação	
$C_d$	Coefficiente de arrasto	
$F_d$	Força de arrasto	N
$F_l$	Força de sustentação	N
$F_t$	Força tangencial	N
$TSR$	Velocidade de ponta de pá ( <i>Tip Speed Ratio</i> )	
$R$	Raio	m
$Re$	Número de Reynolds	
$T$	Torque	$\text{N} \cdot \text{m}$
$V_r$	Velocidade resultante	m/s
$V_\infty$	Velocidade do escoamento não perturbado	m/s

$V_t$	Velocidade tangencial	m/s
-------	-----------------------	-----

**Símbolos gregos**

$\rho$	Massa específica	Kg/m <sup>3</sup>
--------	------------------	-------------------

$\omega$	Velocidade de rotação	rad/s
----------	-----------------------	-------

$\mu$	Viscosidade dinâmica	Pa · s
-------	----------------------	--------

$\theta$	Posição azimutal	ř
----------	------------------	---

$\beta$	Ângulo de inclinação	ř
---------	----------------------	---

$\alpha$	Ângulo de ataque	ř
----------	------------------	---

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização e Motivação

Nos últimos anos, o interesse pela energia eólica e outras fontes de energia renovável tem despertado a atenção da comunidade científica (SCUNGIO et al., 2016). Esse crescente interesse foi acelerado devido a crescente conscientização sobre os impactos negativos dos gases de efeito estufa, aquecimento global causados pela exploração de reservas de energia tradicionais e regulamentações ambientais mais rígidas no mercado global de energia e na sociedade (BHUYAN; BISWAS, 2014; GHASEMIAN; ASHRAFI; SEDAGHAT, 2017). Em vista desses fatores, é evidente que o interesse crescente na energia eólica é uma resposta necessária para enfrentar os desafios relativos à produção de energia elétrica e ambientais do nosso tempo.

As turbinas eólicas, responsáveis por converter a energia cinética do vento em energia elétrica, podem ser classificadas em dois tipos principais: de eixo vertical (VAWT<sup>1</sup>) e de eixo horizontal (HAWT<sup>2</sup>). Portanto, a energia eólica se destaca como uma alternativa confiável e promissora para a produção de energia elétrica, oferecendo opções viáveis e sustentáveis por meio de VAWTs e HAWTs para atender as necessidades de fornecimento de energia de cada local.

Comparadas às HAWTs, as VAWTs são omnidirecionais, o que significa que podem capturar o vento de qualquer direção sem a necessidade de um sistema que altera o posicionamento das turbinas, como por exemplo, o controle de *yaw*

---

<sup>1</sup> Sigla do termo original em inglês: *Vertical Axis Wind Turbine*.

<sup>2</sup> Sigla do termo original em inglês: *Horizontal Axis Wind Turbine*.

existente nas turbinas HAWTs . Além disso, as VAWTs tem o gerador localização no solo, que reduz os custos de instalação e manutenção e também apresentam uma menor produção de ruído por terem velocidade de ponta de pá inferiores às HAWTs. Essas características tornam as turbinas de eixo vertical ideais para aplicações em ambientes urbanos (ERIKSSON; BERNHOFF; LEIJON, 2008). Outro ponto que se destaca é a densidade de potência das VAWTs, que é calculada como a relação entre a potência nominal da turbina e a área varrida pelas pás do rotor quando giram 360°. As VAWTs apresentam uma densidade de potência superior em comparação às HAWTs (DABIRI, 2011).

Apesar das diferenças mencionadas, as VAWTs não dominam o mercado de energia eólica. As HAWTs são as mais comumente utilizadas e têm sido preferidas pela indústria. Isso se deve a diversos fatores, como a eficiência geralmente menor das VAWTs em comparação com as HAWTs, a capacidade das HAWTs operarem em alturas elevadas e se beneficiar da disponibilidade de recursos eólicos mais abundantes (ventos com maiores velocidades e mais constantes) e o maior desenvolvimento tecnológico das turbinas de eixo horizontal ao longo dos anos. Esses motivos têm contribuído para a predominância das turbinas de eixo horizontal no mercado.

Há diversos tipos de VAWTs, cada um com suas próprias características e particularidades (PARASCHIVOIU, 2002). Essas turbinas podem ser divididas em dois grupos principais, de acordo com o princípio aerodinâmico principal que operam: turbinas de arrasto, Figura 1.1 a, e turbinas de sustentação, Figura 1.1 b.

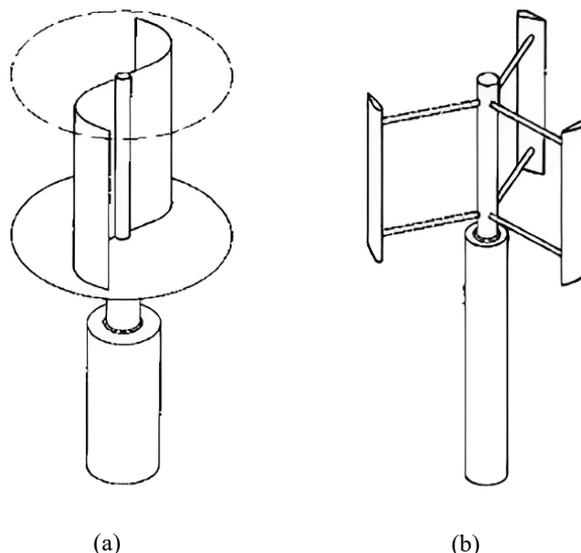


Figura 1.1 – Tipos de VAWTs. (a) Arrasto; (b) Sustentação. Adaptado de Hau (2013).

As turbinas de arrasto têm como principal força que impulsiona o movimento rotativo dessas pás o arrasto. O modelo mais comum dessas turbinas é a Savonius, Figura 1.1 (a), que tem uma secção transversal em forma de “S” quando vista de cima. Uma das vantagens dessas turbinas é a sua partida automática, o que não ocorre nas turbinas de sustentação.

O grupo das turbinas de sustentação são compostas por uma série de aerofólios montados em um eixo ou estrutura rotativa. A força de sustentação do aerofólio das pás é responsável por produzir o torque. Dentre as várias configurações possíveis, destaca-se a configuração mais comum conhecida como H-Darrieus ou H-rotor, Figura 1.1 (b), em que as pás são montadas verticalmente. Em geral, esse tipo de turbina exige que o rotor seja acionado por um motor até atingir a velocidade de rotação autônoma, a partir da qual o dispositivo opera produzindo potência.

O modelo H-Darrieus é caracterizado por apresentar variação no torque devido à distribuição desigual das forças aerodinâmicas. Esse fenômeno ocorre em

decorrência da posição angular da pá no eixo de rotação, conhecida como posição azimutal. À medida que a pá gira, a força aerodinâmica aplicada sobre ela varia, resultando em uma variação no torque gerado pela turbina. Essa particularidade da turbina H-Darrieus é importante para compreender o seu funcionamento e desempenho.

A concepção do modelo H-Darrieus apresenta inúmeros parâmetros que precisam ser analisados, pois são responsáveis por alterar seu desempenho, como por exemplo, o comprimento da corda, solidez, ângulo de inclinação, velocidade de ponta de pá ( $TSR^3$ ). O ângulo de inclinação é um ajuste na inclinação das pás no plano de rotação da turbina. Quando esse ajuste acontece, o ângulo de ataque em cada posição azimutal das pás se altera, afetando assim a interação entre as pás e o vento.

Além disso, é importante ressaltar que o ângulo de ataque é definido como o ângulo formado entre a direção da velocidade incidente e a corda da pá da turbina. O ângulo de ataque de turbinas H-Darrieus varia com a posição azimutal. Isso significa que, à medida que as pás se movem em torno do eixo, o ângulo de ataque também varia ao longo de uma rotação. Essa rápida mudança experimentada pelas pás causa o fenômeno do estol dinâmico.

O estol dinâmico, Figura 1.2, representa o principal desafio aerodinâmico enfrentado pelas turbinas H-Darrieus (BUCHNER et al., 2018). Esse fenômeno ocorre quando os aerofólios sofrem variações rápidas do ângulo de ataque que ultrapassam o ângulo de estol estático. Como resultado dessas variações, ocorre um escoamento inverso na borda de fuga do aerofólio, levando a uma separação tardia do escoamento. Isso gera um aumento na sustentação e a formação de um vórtice próximo à borda de ataque. Esse vórtice conhecido como vórtice de estol dinâmico, é o principal responsável pelo aumento na força de sustentação e no arrasto. A elevação pode ser causado por três efeitos. O primeiro tem relação com grande aumento de pressão de sucção na superfície da pá, na região que o vórtice é formado. O segundo pode ser explicado através do efeito Magnus (CHOUDHRY et al., 2014). O efeito Magnus está relacionado à geração de sustentação em objetos que estão em rotação e translação em um fluido. No contexto do aerofólio, é possível

---

<sup>3</sup> Sigla do termo original em inglês: *Tip Speed Ratio*.

equiparar o comportamento do vórtice de estol dinâmico ao de um cilindro rotativo, acrescentando circulação adicional ao sistema (CHOUDHRY et al., 2014). O terceiro efeito é o mecanismo de geração de sustentação de Weis-Fogh, que está relacionado ao mecanismo de voo de determinados insetos, cujo movimento das asas é tal que provoca a formação de vórtices em uma das suas superfícies, com a consequente produção de sustentação (WEIS-FOGH, 1973; LIGHTHILL, 1973; MAXWORTHY, 1979; CHEN et al., 2023).

Tanto o efeito Magnus e o Weis-Fogh são baseados no teorema de Kutta-Joukowski que estabelece que a sustentação por unidade de comprimento de corda,  $L$ , de um aerofólio é dada por

$$L = \rho U_{\infty} \Gamma, \quad (1.1)$$

em que  $\Gamma$  é a circulação total ao redor do aerofólio,  $\rho$  é a massa específica e  $V_{\infty}$  é a velocidade do escoamento não perturbado.

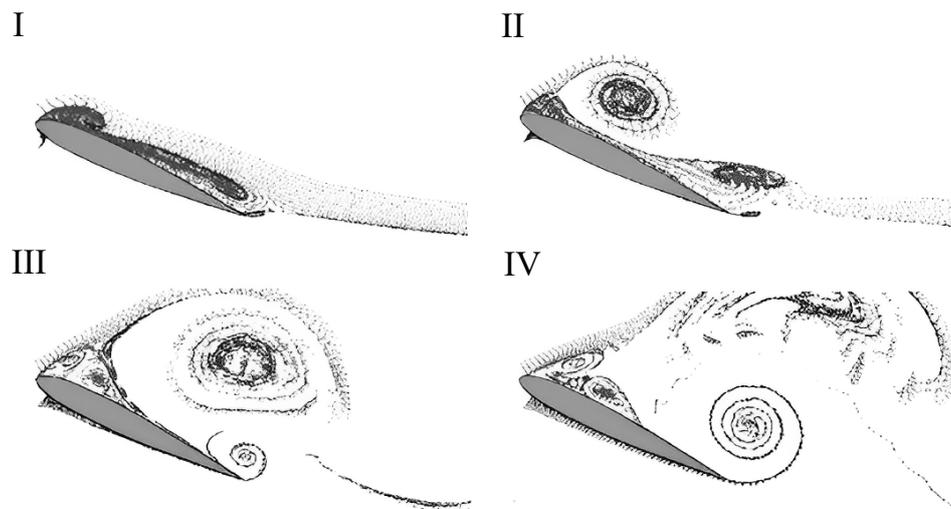


Figura 1.2 – Perfil em condição de estol dinâmico. I- Início da separação da camada limite no bordo de ataque; II- Desenvolvimento de um vórtice no bordo de ataque; III- Liberação do vórtice no bordo de ataque e formação de um vórtice no bordo de fuga; IV- Liberação do vórtice do bordo de fuga. Adaptado de (LARSEN; NIELSEN; KRENK, 2007).

Quando ocorre liberação do vórtice de estol dinâmico, Figura 1.3, a pá sofre

uma completa separação da camada limite. Essa separação resulta em uma queda abrupta na sustentação (CHOUDHRY; ARJOMANDI; KELSO, 2016) que pode induzir vibrações estruturais e aumentar ruído (BUCHNER et al., 2018). Após essa separação, os vórtices liberados pela pá podem interagir com outras partes mecânicas da turbinas, mais notadamente outras pás. Essas interações complexas podem interferir tanto no escoamento (e por consequência nos mecanismos de geração de sustentação e arrasto) como produzir vibrações mecânicas indesejáveis (COTON et al., 2004; FELLI, 2021; GARDNER et al., 2023).

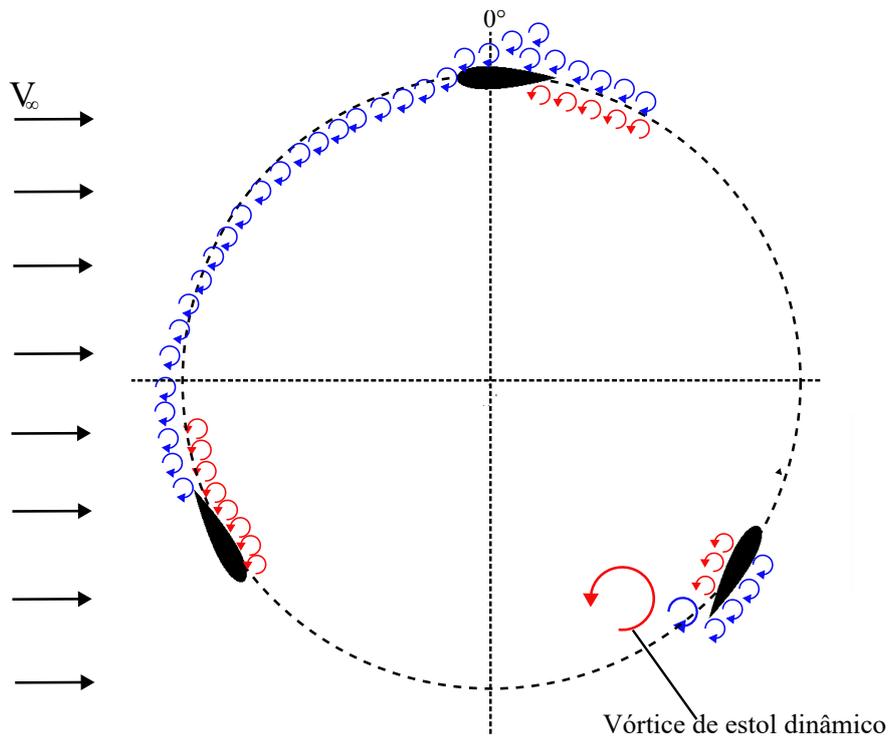


Figura 1.3 – Ilustração esquemática do campo de vorticidade, com desprendimento do vórtice de estol dinâmico. (—) Vórtice no sentido anti-horário; (—) Vórtice no sentido horário.

A eficiência de uma turbina é avaliada pelo coeficiente de potência, que é a relação entre a potência extraída do escoamento, igual ao torque no eixo do rotor multiplicado pela velocidade de rotação, e a potência cinética do escoamento. Essa relação pode ser expressa como

$$C_p = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho AV_\infty^3}, \quad (1.2)$$

em que  $T$  é o torque da turbina,  $\omega$  é a velocidade de rotação da turbina e  $A$  é a área da turbina.

Recentemente, têm surgido técnicas promissoras para aprimorar a eficiência das turbinas eólicas de eixo vertical, como o uso de paredes guias, Figura 1.4 a, estatores, Figura 1.4 b, placas defletoras, Figura 1.4 c, e difusores, Figura 1.4 d. As placas defletoras são posicionadas a montante da turbina para redirecionar o escoamento de vento, otimizando o desempenho aerodinâmico. As paredes guias e estatores, por sua vez, são estrategicamente colocados ao redor das pás da turbina para direcionar o escoamento de maneira favorável, minimizando recirculações indesejadas e perdas de energia. Além disso, os difusores instalados nas extremidades das pás aceleram o escoamento de vento, aumentando a velocidade central da turbina e melhorando a eficiência de conversão da energia cinética em energia elétrica.

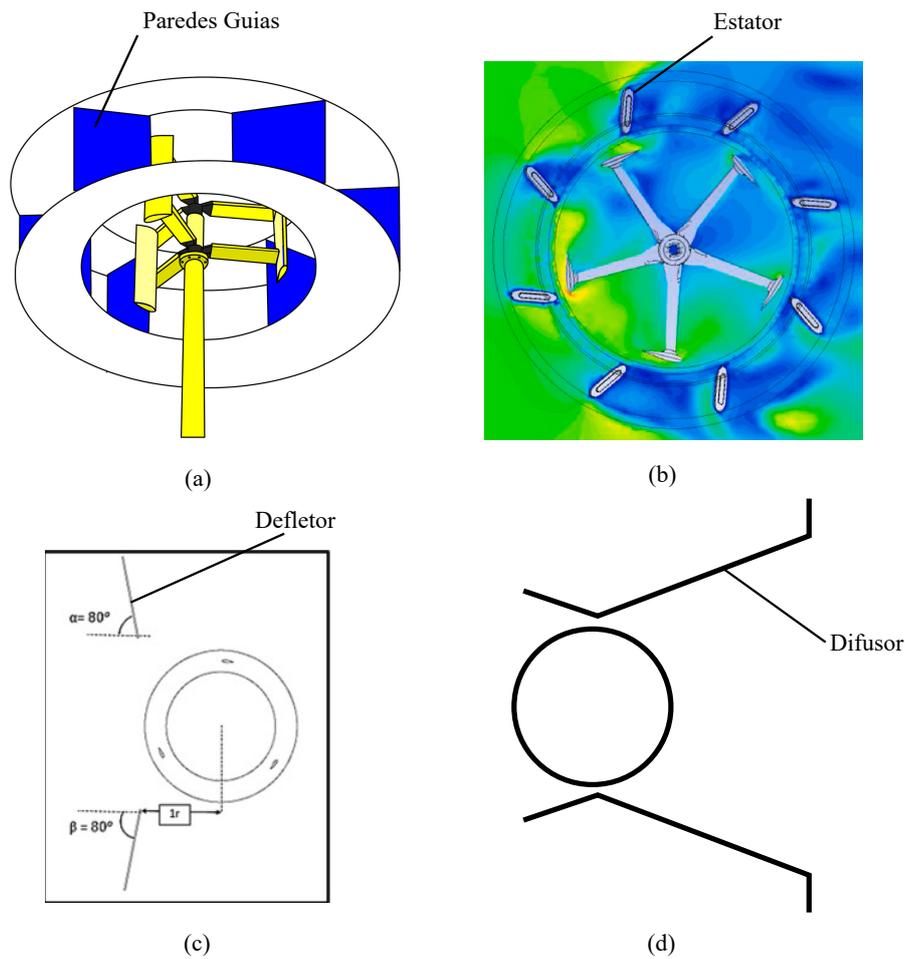


Figura 1.4 – Dispositivos utilizados para aumentar a eficiência da turbina. (a) Paredes guias. Adaptado de Ansaf et al. (2023); (b) Estator. Adaptado de Wilberforce e Alaswad (2023); (c) Defletor. Adaptado de Zidane et al. (2023); (d) Difusor.

Outras técnicas utilizadas são as alterações na própria turbinas, mais especificamente nas pás. Como as abas de Gurney, Figura 1.5 b, winglets, Figura 1.5 c, variação do ângulo de inclinação, Figura 1.5 d, e o *slot*, Figura 1.5 a. As abas de Gurney são pequenas saliências verticais próximas às extremidades das pás, que modificam o perfil aerodinâmico, aumentando a sustentação e, conseqüentemente, a eficiência da turbina. Por sua vez, os winglets são dispositivos curvados instalados nas extremidades das pás, que reduzem as perdas de energia decorrentes da formação de vórtices. Ângulo de inclinação ( $\beta$ ) é ajustado para alterar o ângulo de ataque

( $\alpha$ ) e assim modificar as forças de sustentação ( $F_l$ ), arrasto ( $F_d$ ) e tangencial ( $F_t$ ) para maximizar o desempenho da turbina. Além dessas técnicas, o *slot*, uma fenda localizada no bordo de ataque, desempenha um papel fundamental ao reenergizar a camada limite, evitando o fenômeno de estol (SMITH; SCHNEIDER, 1995). Essas técnicas aerodinâmicas têm o potencial de melhorar significativamente o desempenho de uma turbina eólicas de eixo vertical.

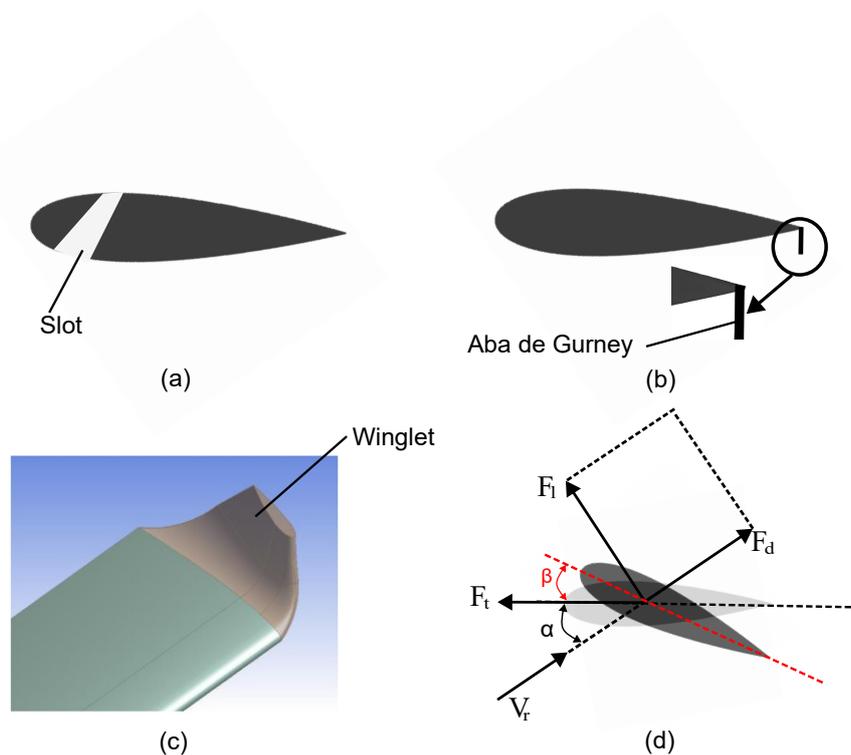


Figura 1.5 – Modificações na pá para aumentar a eficiência da turbina. (a) Slot; (b) Aba de Gurney; (c) Winglet. Adaptado de Zhang et al. (2019); (d) Variação do ângulo de inclinação.

## 1.2 Revisão da literatura

Ao longo dos anos, surgiram diversas metodologias analíticas para estudar as VAWTs (ISLAM; TING; FARTAJ, 2008), embora a maioria das pesquisas tenha se concentrado nas HAWTs. O modelo analítico de tubo de corrente, proposto por Templin (1974), é uma abordagem popular para prever o desempenho das VAWTs

do tipo Darrieus. Ele se destaca pela sua simplicidade, baixo custo computacional, robustez e facilidade de implementação.

Nesse modelo, a turbina é considerada como um único tubo de corrente, onde o conceito de disco atuador é incorporado em uma turbina Darrieus. Assume-se que a velocidade do escoamento é constante a montante e a jusante da turbina, e também são considerados os efeitos de variáveis geométricas, como a solidez do rotor e a relação altura-diâmetro (TEMPLIN, 1974). Esse modelo básico foi aprimorado com o tempo, resultando em abordagens mais avançadas, como o modelo de tubo de corrente múltiplo proposto por Wilson, Lissaman e Walker (1976). Nessa abordagem, a turbina é dividida em uma série de tubos de corrente paralelos adjacentes, onde são aplicadas teorias de disco atuador em cada tubo.

Outro avanço é o modelo de tubo de corrente múltiplo-duplo, proposto por Paraschivoiu (2002). Nesse modelo, o domínio do escoamento é discretizado em um conjunto de tubos de corrente adjacentes, onde cada tubo possui dois atuadores em conjunto: um localizado no meio do ciclo do rotor a montante e o outro no meio-ciclo a jusante. Essa abordagem leva em consideração dois aspectos importantes da física do escoamento: as condições de escoamento em constante mudança experimentadas pelas pás e as diferenças de velocidade do vento percebidas entre a região a montante e a jusante do rotor.

Embora os modelos analíticos de tubo de corrente tenham sido amplamente utilizados para estudar as turbinas eólicas, eles apresentam limitações significativas em prever o comportamento do escoamento. Esses modelos simplificados não levam em consideração informações sobre a esteira e empregam apenas equações semi-empíricas para modelar os efeitos do vórtice de ponta de pá. Além disso, usam curvas de coeficientes de sustentação e arrasto de aerofólios obtidos para o caso estático, o que os torna incapazes de prever com exatidão quando o aerofólio sofre estol dinâmico (AYATI et al., 2019).

Para superar essas limitações e obter uma compreensão mais precisa do comportamento das VAWTs, a dinâmica dos fluidos computacional (CFD<sup>4</sup>) tem sido amplamente adotada em pesquisas de energia eólica (SHOURANGIZ-HAGHIGHI

---

<sup>4</sup> Sigla do termo original em inglês: *Computational Fluid Dynamics*.

et al., 2020). O CFD é reconhecido como o modelo mais abrangente, capaz de fornecer dados precisos sobre o escoamento ao redor das turbinas. Ao contrário dos modelos analíticos, o CFD leva em consideração fenômenos complexos, como o estol dinâmico e os efeitos do vórtice de ponta de pá, e permite uma otimização mais refinada das VAWTs. Assim, o CFD emerge como uma solução eficaz para melhorar a predição e otimização de turbinas eólicas, oferecendo resultados mais confiáveis e relevantes para a indústria e pesquisadores (PARASCHIVOIU, 2002; GHASEMIAN; ASHRAFI; SEDAGHAT, 2017).

Com o interesse crescente em VAWT, as pesquisas científicas foram direcionadas para melhorar a eficiência dessas turbinas. Ansaf et al. (2023) fizeram uso de paredes guias ao redor do rotor H-Darrieus. O escoamento que passa entre as paredes guias apresenta um aumento na sua velocidade devido o efeito Venturi, que faz o ar fluir de uma área ampla para uma estreita antes de atingir as pás da turbina. Como resultado, existe uma aparente redução do comprimento da esteira, atraso na separação do escoamento da pá e apresenta um aumento de 177% no coeficiente de desempenho da turbina.

No estudo conduzido por Wilberforce e Alaswad (2023), investigou-se a influência de um estator na eficiência das turbinas H-Darrieus. Os resultados revelaram que a eficiência está diretamente relacionada à orientação das pás do estator. Observou-se que a presença de uma superfície que converge no topo, mas diverge na parte inferior, é recomendada para acelerar o escoamento a montante e desacelerá-lo a jusante. A implementação desse estator otimizado resultou em um aumento de 36% no coeficiente de potência.

Zidane et al. (2023) investigaram o efeito dos defletores a montante no desempenho de turbinas H-Darrieus. Observou-se que o uso de um único defletor aumenta o torque máximo devido à maior velocidade do escoamento sobre a pá, mas tem um efeito adverso no torque negativo. No entanto, ao adicionar dois defletores a montante, essa desvantagem é superada, bloqueando o escoamento na zona onde a pá se move na direção oposta ao vento e concentrando-o na zona de maior torque. Além disso, constatou-se que o torque positivo aumenta na zona de co-rotação (giram no mesmo sentido) devido à criação de uma esteira que acelera o escoamento em direção às pás. Por outro lado, o torque na zona de contra-rotação

(giram no sentido contrário) é reduzido devido à presença do defletor. Os resultados mostraram um aumento de 22% no coeficiente de potência com o uso de dois defletores e uma ampliação na faixa de operação da turbina. O ponto ótimo de operação também foi afetado, saindo de 2,6  $TSR$  para 3,1 com um defletor e 3,3 com dois defletores.

Wang et al. (2022) e Ranjbar et al. (2021) também propuseram soluções para melhorar a eficiência de uma turbina H-Darrieus. Wang et al. (2022) utilizaram um difusor de placas em uma H-Darrieus de 5 pás, resultando em maior aceleração angular e capacidade de autopartida aprimorada. Os resultados da simulação e experimentos mostraram consistência, com um aumento de 31,42% no coeficiente de potência. Isso se deve à formação de uma região de pressão negativa atrás do difusor e uma pressão positiva montante, que aumentam a velocidade do escoamento através da turbina.

Por outro lado, Ranjbar et al. (2021) foram além do difusor e também incluíram uma flange e um bocal, criando um canal para a turbina. Além dos efeitos observados no estudo de Wang et al. (2022), essa configuração adicional resultou em uma diferença de pressão entre os lados das pás, contribuindo para um aumento das forças aerodinâmicas. O canal ajudou no avanço da formação dos vórtices de ponta de pá e retardou sua separação, o que também contribuiu para o aumento das forças aerodinâmicas. Com essa configuração, eles alcançaram um coeficiente de potência de 0,84, três vezes maior do que o valor normal, para um  $TSR = 2,15$ , representando um aumento de 0,52 no valor do  $TSR$ .

A Aba de Gurney (GF<sup>5</sup>) tem sido utilizada para aumentar a eficiência das turbinas H-Darrieus. Liu et al. (2022) utilizaram uma GF articulada que altera sua posição de acordo com o movimento da pá, resultando em uma melhoria de aproximadamente 30% no coeficiente de potência. A GF articulada evitou a separação da camada limite em uma posição azimutal onde a GF fixa e o caso sem GF apresentam uma separação completa. Syawitri et al. (2022) otimizaram uma GF e observaram que a melhoria no desempenho começa a diminuir para  $TSR=3,3$ . Para  $TSR=1,44$ , o coeficiente de potência aumentou em 233,19% em comparação com a pá sem GF, enquanto para  $TSR=2,64$  o aumento foi de 69,94%, e em uma

<sup>5</sup> Sigla do termo original em inglês: *Gurney Flap*

faixa alta com  $TSR=3,3$ , o aumento chegou a 41,36%. Isso ocorre possivelmente devido à maior faixa de ângulos de ataque em pás com  $TSR$  menor, incluindo ângulos além do ponto de estol estático do perfil aerodinâmico.

Outras alterações na geometria da pá também foram investigadas. Gonçalves, Pereira e Sousa (2022) utilizaram protuberâncias no bordo de ataque para controlar o comportamento do estol dinâmico. Essa modificação resultou em uma redução na intensidade dos vórtices de ponta e uma redução do efeito do estol dinâmico. O coeficiente de potência variou entre 46% e 20% para velocidades do vento de 5.5 m/s a 9 m/s, respectivamente, além de reduzir a velocidade inicial em 20% e o tempo necessário para atingir a operação nominal. Xu et al. (2020) utilizaram winglets e alcançaram uma melhoria de 16% a 19%. Os winglets impactaram positivamente na força, resultando em um aumento significativo da força em sua componente tangencial. Além disso, ao estudar os vórtices de ponta, foi observado que os winglets não diminuíram a intensidade desses vórtices, mas na verdade os fortaleceram, gerando uma força aerodinâmica resultante maior. Mohamed et al. (2020) aplicaram *slot* na pá e estudaram seus parâmetros. O uso do *slot* atrasou a separação da camada limite em altos ângulos de ataque, resultando em um torque melhorado. O coeficiente de potência encontrado foi três vezes maior para  $TSR=2$ .

Diversas investigações numéricas foram realizadas por diferentes autores, tais como Paraschivoiu, Trifu e Saeed (2009), Fiedler e Tullis (2009), Hwang, Lee e Kim (2009), Silva e Kanizawa (2023), Kavade e Ghanegaonkar (2020), Mohammed, Sahin e Ouakad (2020), Abdalrahman et al. (2021), Zhao et al. (2018), com o objetivo de avaliar o impacto do controle do ângulo de inclinação variável das pás, ajuste do ângulo de inclinação para encontrar o ângulo de ataque ideal em cada posição azimutal, na otimização da eficiência de turbinas eólicas. Os resultados indicaram uma significativa melhora de aproximadamente 20% no desempenho das turbinas com o uso desse controle. No entanto, implementar o mecanismo de variação do ângulo de inclinação é uma tarefa complexa e de alto custo, o que torna essa estrutura extremamente dispendiosa. Isso ocorre devido à necessidade de ajustar o ângulo de inclinação para o ângulo de ataque ideal, considerando a influência do valor do  $TSR$  e a direção do escoamento incidente na pá.

Diversos autores concluíram que o uso de ângulos de inclinação fixo com

um valor negativo contribui para o aumento do coeficiente de potência. Todos identificaram um atraso na separação da camada limite. Essa mudança de ângulo permitiu que cada pá operasse por mais tempo próximo de seu ângulo de ataque ótimo, atrasando os efeitos de estol e contribuindo para uma melhor aderência do escoamento a superfície. Este fenômeno foi ressaltado por todos os autores como um dos fatores contribuintes para o aumento do torque. Os autores observaram que este acréscimo no torque médio gerado pela turbina não é decorrente de um maior pico na geração do torque das pás mas sim de um incremento no intervalo da produção de torque positivo de cada pá (CHANDRAMOULI et al., 2014; REZAEIHA; KALKMAN; BLOCKEN, 2017; SUN et al., 2021; HAU et al., 2020; ARDANEH; ABDOLAHIFAR; KARIMIAN, 2022). Chandramouli et al. (2014) descobriram que a sua turbina tem um ângulo de inclinação de  $-6^\circ$  apresenta o melhor coeficiente de potência para as relações de  $TSR$  de 1 a 2,2, e velocidades do escoamento, 6, 8 e 10 m/s. De forma semelhante, Rezaeiha, Kalkman e Blocken (2017) concluíram que um ângulo de inclinação de  $-4^\circ$ , em um  $TSR=4$ , pode aumentar o coeficiente de potência em 6,6%. Em um estudo mais recente, Sun et al. (2021) investigaram o ângulo de inclinação ideal para uma H-Darrieus de 5 e 3 pás. O ângulo de inclinação ideal para as duas configurações foi de  $-4^\circ$ . Um aumento de até 5,89 vezes no coeficiente de potência foi alcançado para uma velocidade de 6 m/s com 5 pás, enquanto um aumento máximo de 5,14 vezes foi obtido para uma velocidade de 9 m/s com 3 pás.

Durante a revisão da literatura, foram identificadas algumas lacunas no conhecimento atual sobre a influência do ângulo de inclinação no rotor H-Darrieus. Como a influência que o ângulo de inclinação tem na alteração da separação da camada limite. Na literatura existem muitas evidências que indicam que a separação da camada limite tem um papel fundamental na produção de torque da turbina e que entender como o ângulo de inclinação influencia isso é importante para compreender como usar esse parâmetro para melhorar projetos.

Na mesma linha, outra lacuna é que não se sabe como o ângulo de inclinação influencia no desenvolvimento da esteira de vorticidade das pás de uma turbina. A esteira de vorticidade de uma pá está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento e colapso da CL, que já se viu, é de grande importância na produção de torque. Por

outro lado, a esteira de vorticidade de uma pá pode eventualmente interagir com outra pá em determinado ponto do ciclo da turbina. A descrição e entendimento dessas interações ainda não foram explorados na literatura científica, até onde pudemos verificar. As possíveis consequências dessas interações estão relacionadas com a geração de torque da pá e o aumento na produção de ruído e na vibração da estrutura. Um dos aspectos mais inovadores neste trabalho é precisamente explorar essas interações.

### 1.3 Definição do problema e objetivos

O presente estudo considera-se uma turbina do tipo H-Darrieus de três pás retas, Figura 1.6, com aerofólio NACA 0022, com dimensões indicadas na Tabela 1. Um escoamento de perfil uniforme, na direção  $x$ , número de Reynolds de 30696, velocidade média de 4,31 m/s e intensidade de turbulência de 1% com escala de comprimento de 0,01 m incide sobre a turbina. A turbina gira com velocidade angular constante de 274,2 rpm. O principal problema do presente trabalho é estudar o escoamento através da turbinas e o torque em função da posição azimutal para ângulo os angulo de inclinação de  $0^\circ$  e  $-5^\circ$ . O ângulo de inclinação igual à  $-5^\circ$  porque há evidência na literatura de esse ângulo é próximo do ótimo. Neste trabalho, foi adotada a mesma geometria utilizada por (HOWELL et al., 2010) objetivo foi ter inicialmente uma referência para fins de validação por meio de comparação dos resultados numéricos do presente estudo com os resultados experimentais na referência.

Tabela 1 – Dados da turbina

Parâmetros	Valores
Diâmetro (m)	0,6
Comprimento da corda (m)	0,1
Tamanho da pá (m)	0,4
Número de pás (-)	3
Velocidade de entrada (m/s)	4,31
Velocidade de ponta de pá	1,87
Perfil da pá	NACA 0022

O objetivo deste trabalho é estudar como variações do ângulo de inclinação influenciam no fenômeno de estol dinâmico de uma turbina H-Darrieus, na interação das pás com as esteiras individuais de cada pá e suas consequências para a produção de potência mecânica desse tipo de dispositivo. Pretende-se entender como o ângulo de inclinação altera o padrão de emissão de vórtices de uma pá, especialmente em relação à posição azimutal em que esse fenômeno ocorre. Serão investigados os efeitos do ângulo de inclinação nas curvas de torque e potência instantâneos da turbina, com ênfase no entendimento dos fenômenos aerodinâmicos associados. Também será estudado o efeito de variações do ângulo inclinação na curva de coeficiente de potência médio em função da razão de velocidade de ponta de pá. Espera-se promover avanços no entendimento sobre o escoamento turbulento através de uma turbina H-Darrieus que apontem para soluções aplicadas e linhas de investigação científica que possam contribuir para o amadurecimento desta tecnologia como um vetor sustentável de produção de energia elétrica.

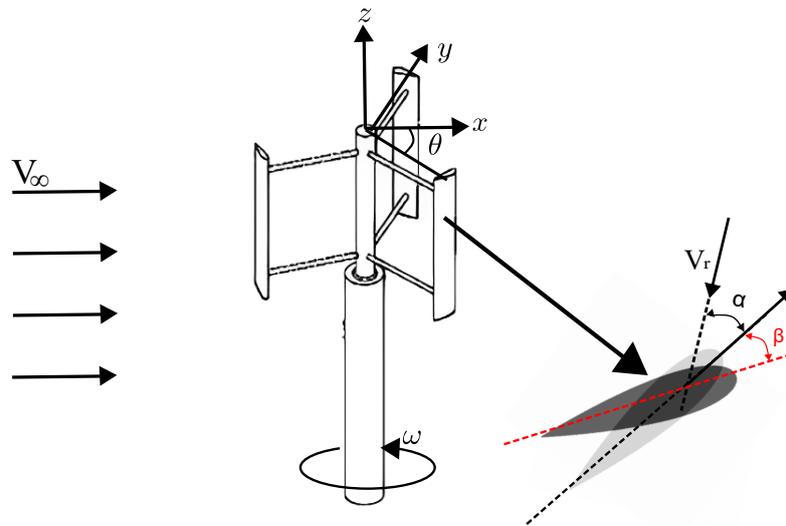


Figura 1.6 – Turbina H-Darrieus e parâmetros do problema. A turbina opera em um escoamento não perturbado na direção  $x$  ( $V_\infty$ ), com uma rotação na direção  $z$  ( $\omega$ ) e a variação do ângulo de inclinação ( $\beta$ ), que é o parâmetro de interesse do problema. Adaptado de Hau (2013).

## 2 METODOLOGIA NUMÉRICA

O escoamento através de um rotor de turbina de eixo vertical em funcionamento é intrinsecamente transiente. As escalas em que as variações temporais de velocidade e pressão acontecem nesse tipo de escoamento podem ser separadas em duas: as compatíveis com os intervalos na ordem do período de rotação da turbina, e as associadas à turbulência de alta frequência resultante da interação entre o escoamento livre e os elementos mecânicos do rotor. Dessa maneira, a análise do problema pode ser feita usando Simulação de Grandes Escalas<sup>1</sup> (LES<sup>2</sup>) ou simulação das Equações Médias de Reynolds Transientes (URANS<sup>3</sup>). Para o pleno desenvolvimento deste trabalho, são necessárias dezenas de simulações com parâmetros distintos. Em geral, as simulações URANS são muito mais rápidas e capazes de prever com acurácia os fenômenos importantes para a determinação de grandezas integrais, como torque e potência de uma turbina. Sendo assim, para este trabalho de mestrado, optou-se por usar URANS nas simulações, conjugando assim a velocidade desse tipo de metodologia, com a capacidade de prever fenômenos transientes na escala de tempo do período do rotor.

As equações médias de Reynolds podem assumir várias formas, dependendo do tipo de escoamento e das necessidades de modelagem. Entre essas formas, destacam-se três abordagens principais. A primeira delas é *Time averaging*,

---

<sup>1</sup> Simulação direta seriam teoricamente possíveis, porém, considerando os recursos computacionais disponíveis para a realização do presente, essa possibilidade foi descartada.

<sup>2</sup> Sigla do termo original em inglês: *Large Eddy Simulation*.

<sup>3</sup> Sigla do termo original em inglês: *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes*

adequada para escoamentos turbulentos que, em média, não exibem variações significativas ao longo do tempo. Pode ser definida como

$$\bar{v}(\mathbf{x}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(\mathbf{x}, t) dt, \quad (2.1)$$

em que  $v$  são as componentes do vetor velocidade e  $T$  é o período de tempo considerado para a média. A segunda abordagem é a *Spatial averaging*, apropriada para escoamentos turbulentos nos quais a média é uniforme em todas as direções, é definida como

$$\tilde{v}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{V} \iiint v(\mathbf{x}, t) dV, \quad (2.2)$$

em que  $V$  é o volume de controle pequeno, em geral definido pelo própria malha de discretização do domínio, sobre a qual a média é calculada. Por fim, a terceira forma, média de probabilidade (*Ensemble average*), que é a abordagem mais geral. Ela envolve a coleta de dados a partir de múltiplas simulações e, subsequentemente, o cálculo da média dos valores correspondentes. É expressa pela seguinte equação

$$\langle v \rangle(\mathbf{x}, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v(\mathbf{x}, t), \quad (2.3)$$

em que  $N$  é o número de simulações simulações.

Muitos problemas de ordem prática na engenharia requerem conhecimentos apenas acerca das quantidades médias temporais do escoamento, como por exemplo, no escoamento turbulento através de tubulações, ou ao redor de um aerofólio em condições permanentes de operação. Nesses casos, a média de Reynolds (como dada pela equação (2.1)) é suficiente para quantificar os efeitos da turbulência. No entanto, há diversas situações que a apenas a média temporal é insuficiente para representar todos os fenômenos de interesse ou que aqueles que são preponderantes para o problema em estudo. Exemplos são o escoamento ao redor de pás de helicópteros durante o voo (WILCOX et al., 1998), ou em aerofólios sob a ação de estol intermitente, ou ainda em escoamentos ao redor das asas de pássaros e insetos. A característica principal da turbulência, comum a esses escoamentos, é a ocorrência concomitante de estruturas do escoamento com escalas de tempo

e comprimento característicos muito diferentes. Em outras palavras, em todos esses escoamentos, há variações de propriedades que ocorrem em escalas de tempo lentas quando comparadas ao que as mais rápidas variações de observáveis, em geral associadas à turbulência das menores escalas. Nessas situações, partindo do pressuposto de que não seja possível realizar uma simulação numérica direta, o ideal é empregar a média espacial e desenvolver LES. No entanto, mesmo filtrando parcela relevante das estruturas turbulentas, a LES é uma metodologia muito cara do ponto de vista computacional, e não é incomum que uma única simulação demore semanas ou meses. As simulações que são necessárias para o desenvolvimento do presente trabalho enquadram-se nessa categoria e seria inviável atingir os objetivos propostos usando tal metodologia. Por isso, como já se disse, optou-se pelo uso do URANS. Nesses casos, a equação (2.1) precisa ser adaptada da seguinte forma

$$\bar{v}_i(x_j, t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_i(x_j, t) dt, \quad (2.4)$$

em que  $v_i$  são as componentes do vetor velocidade e  $T$  é um intervalo longo o suficiente para filtrar as flutuações de velocidade de alta frequência, porém curto o bastante para descrever o movimento de rotação do rotor. Esse intervalo será o passo de tempo que é aplicado nas simulações. Se  $T \rightarrow \infty$ , então  $\bar{v}_i$  não seria mais uma função do tempo e a formulação recuperaria as equações médias de Reynolds (RANS). Vale ainda mencionar que a formulação URANS pode ser interpretada sob a ótica de um processo de média de probabilidade dos campos de velocidade e pressão. Em outras palavras, é possível interpretar a média temporal assumida para as equações de Reynolds que se vê na literatura sobre modelagem de turbulência (e.g., Eq. 2.24, (WILCOX et al., 1998)) como sendo a média de probabilidade dada pela (2.3). Como as propriedades algébricas das médias temporal (equação(2.4)) e de probabilidade (equação(2.3)) relevantes para a dedução das equações médias são as mesmas, a forma final das equações filtradas é idêntica se escolhermos uma média ou a outra.

A mesma filtragem temporal é aplicada ao campo de pressão. Dessa forma, é possível separar  $v_i$  e  $p$  em uma parte média e uma flutuação segundo

$$v_i(x_j, t) = \bar{v}_i(x_j, t) + v'_i(x_j, t) \quad (2.5)$$

e

$$p(x_j, t) = \bar{p}(x_j, t) + p'(x_j, t). \quad (2.6)$$

Nas equações (2.5) e (2.6),  $\bar{u}_i$  é a velocidade média,  $\bar{p}$  a pressão média,  $u'_i$  é a flutuação de velocidade e  $p'$  a flutuação da pressão. A separação entre média e flutuação como é feito nas equações (2.5) e (2.6) é conhecida como decomposição de Reynolds.

Empregando a decomposição de Reynolds e tomando a média das equações de conservação de massa e quantidade de movimento, obtém-se

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.7)$$

e

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}_j}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{v'_i v'_j}}{\partial x_j} + \bar{f}_j, \quad (2.8)$$

em que  $f_i$  é uma força de campo por unidade de massa e  $\tau_{ij} \equiv \overline{\rho v'_i v'_j}$  é tensor de tensões de Reynolds, que reflete a influência das flutuações turbulentas no balanço médio de quantidade de movimento do escoamento. O tensor de Reynolds não pode ser calculado diretamente e precisa ser modelado em termos das grandezas médias do escoamento (POPE, 2000).

Neste trabalho, a metodologia URANS e o software ANSYS CFX foram utilizados para realizar simulações numéricas de uma turbina eólica de eixo vertical. O primeiro passo para obter uma simulação de qualidade foi identificar o modelo de turbulência adequado para o problema em questão (GHASEMIAN; ASHRAFI; SEDAGHAT, 2017). Com esse objetivo, três modelos de turbulência foram comparados a fim de identificar aquele que melhor prevê os fenômenos físicos complexos do escoamento.

Em seguida, foi realizado um estudo de malhas, comparando os resultados do valor do  $C_p$  encontrado por (HOWELL et al., 2010). Com base nesses resultados, foram executadas duas simulações: uma com ângulo de inclinação igual a  $0^\circ$  e outra com  $-5^\circ$ . Por fim, uma análise foi feita para determinar o efeito que a esteira gerada por uma pá causa na produção de torque de outra pá.

As simulações foram realizadas no Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) da Universidade de Brasília (UnB), utilizando a versão R21.1 do software ANSYS CFX em um equipamento com as especificações apresentadas na Tabela 2

Tabela 2 – Especificações computacionais.

Processador	Intel Xeon E5-2643 3,50 GHz
Quantidade de processadores	2
Quantidade de núcleos	24
Memória RAM	64 GB

## 2.1 Domínio computacional e condições de contorno

A Figura 2.1 ilustra a divisão do domínio em duas partes: um subdomínio rotativo e um subdomínio estacionário. O subdomínio rotativo, representado pela parte cinza, simula o movimento de rotação da turbina e é formado por um cilindro de diâmetro igual a  $3R$  e altura de  $2R$ , onde  $R$  é o raio da turbina 0,3 metros. Já o subdomínio estacionário é composto por um prisma retangular de dimensões  $18R \times 9,5R$  e  $3R$  de altura.

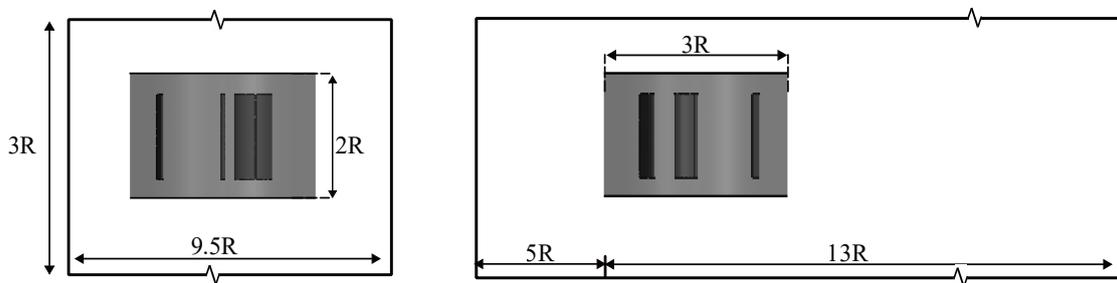


Figura 2.1 – Domínios usados para a geração da malha. A região cilíndrica representa o domínio rotativo e o prisma externo representa a região não rotativa.

As condições de contorno adotadas no modelo computacional da turbina, Figura 2.2, incluem uma velocidade média de entrada de 4,31 m/s e uma intensidade de turbulência de 1%, considerando que o fluido utilizado é ar nas condições atmosféricas padrão. Na face de saída, definiu-se uma condição de pressão igual à

pressão de entrada. As superfícies superior, inferior, laterais, as pás do rotor e o eixo da turbina foram tratados como superfícies com condição de não deslizamento. Para as interfaces de conexão entre o domínio estacionário e o domínio rotativo, utilizou-se a técnica *Sliding Mech Interface* (SMI) que permite simular o movimento relativo transiente entre os componentes e prever a interação do escoamento entre a passagem do estator e do rotor com maior precisão (ANSYS, 2021).

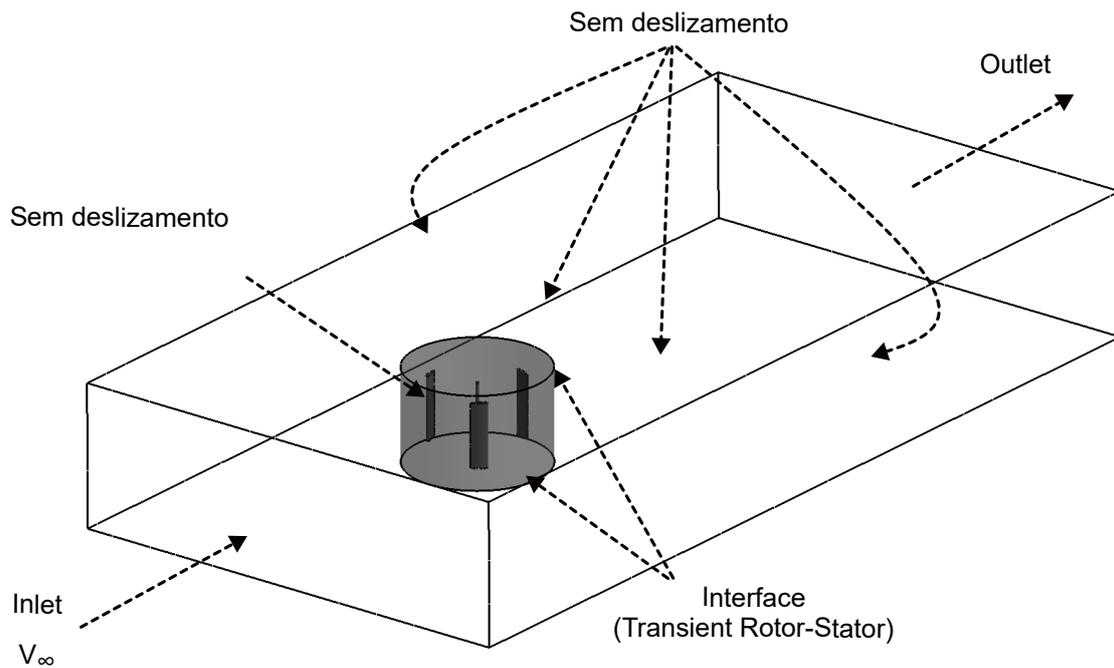


Figura 2.2 – Condições de contorno aplicadas na simulação numérica, sendo a região *inlet* a seção de entrada do escoamento e a *outlet* a seção saída

## 2.2 Avaliação do modelo de turbulência

A modelagem da turbulência é essencial para simular o escoamento de ar em turbinas eólicas. É crucial identificar o modelo de turbulência que melhor representa o escoamento através do rotor, já que isso pode afetar significativamente os resultados obtidos. Embora o modelo de turbulência  $\kappa-\epsilon$  padrão seja amplamente utilizado devido à sua simplicidade, ele não é adequado para lidar com gradientes de pressão e deslocamento da camada limite, que são comuns em escoamentos em

turbinas eólicas.

Com o objetivo de enfrentar esses desafios, outros modelos de turbulência foram desenvolvidos, como o modelo  $\kappa - \epsilon$  RNG e o modelo  $\kappa - \omega$  Shear-Stress Transport (SST). O modelo  $\kappa - \epsilon$  RNG é uma versão modificada do modelo  $\kappa - \epsilon$  Padrão, que utiliza os métodos de Re-Normalização de Grupo desenvolvidos por Yakhot et al. (1992). A abordagem RNG altera a equação da dissipação de energia turbulenta ( $\epsilon$ ) para considerar as diferentes escalas de movimento por meio de mudanças no termo de produção. Por outro lado, o modelo de turbulência  $\kappa - \omega$  SST, proposto por Menter (1993) e Menter (1994), foi desenvolvido para lidar com grandes gradientes adversos de pressão e descolamento da camada limite em escoamentos aeronáuticos.

O modelo  $\kappa - \omega$  SST é uma formulação híbrida que combina os modelos  $\kappa - \omega$  e  $\kappa - \epsilon$  para lidar com diferentes regiões do escoamento. O modelo  $\kappa - \omega$  é aplicado em regiões próximas à parede, ou seja, na camada limite, enquanto o modelo  $\kappa - \epsilon$  é aplicado em regiões de escoamento livre, ou seja, em regiões distantes da parede. Isso é possível graças às funções de troca, que alternam entre os modelos de acordo com a intensidade de turbulência e a distância normal adimensional da parede.

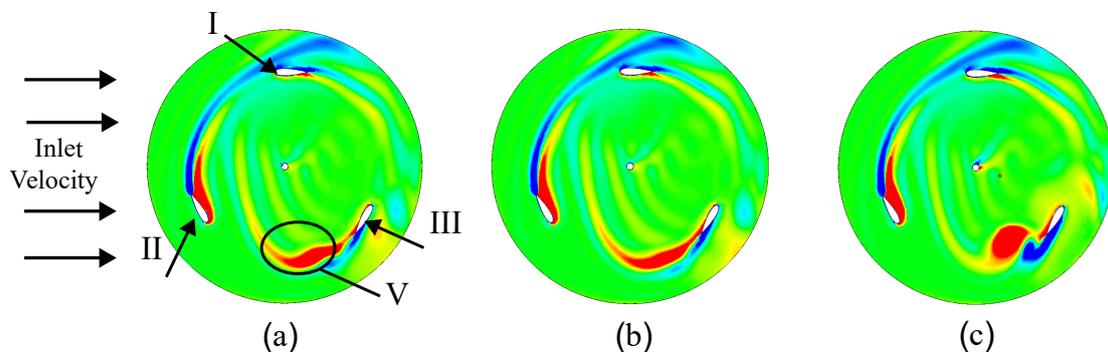


Figura 2.3 – Vorticidade na direção  $z$  no plano  $XY$  para diferentes posições azimutais ( $\theta$ ) usando vários modelos de turbulência. A pá I está sempre localizada em uma posição azimutal de  $0^\circ$ . (a) RNG  $k - \epsilon$ ; (b) Standard  $k - \epsilon$ ; (c) SST  $k - \omega$ . O vórtice de estol dinâmico é destacado na região marcada com a letra V.

Entre os três modelos de turbulência descritos, o modelo  $k - \omega$  SST foi o selecionado como o mais adequado para a simulação do escoamento em turbinas.

Ele apresentou uma melhor descrição dos fenômenos encontrados no escoamento de turbinas, como o vórtice de ponta de pá. A Figura 2.3 demonstra a capacidade do modelo em prever o fenômeno de deslocamento da camada limite, que é indicado pela letra V. Além disso, seus resultados do coeficiente de potência foram mais próximos dos valores experimentais encontrados por (HOWELL et al., 2010), quando comparados com os outros modelos, como pode ser visto na tabela 3. Em resumo, a escolha do modelo de turbulência adequado é essencial para obter uma simulação precisa e confiável de escoamentos em turbinas, e o modelo SST tem se mostrado uma boa opção para essa aplicação.

Tabela 3 – Comparação dos modelos de turbulência  $k-\epsilon$ , RNG  $k-\epsilon$  e SST  $k-\omega$  com os valores encontrados por (HOWELL et al., 2010) para um  $TSR$  de 1.87. Os valores mostram o coeficiente de desempenho.

	$C_p$
$k-\epsilon$	0,21
RNG $k-\epsilon$	0,21
SST $k-\omega$	0,18
(HOWELL et al., 2010) 3D model	0,18
(HOWELL et al., 2010) Experimental	$0,17 \pm 20\%$

## 2.3 Estudo de convergência de malha

O artigo de (ZADEH; KOMEILI; PARASCHIVOIU, 2014), demonstra que o aumento no refinamento da malha da simulação de uma turbina de eixo vertical causa um aumento no valor do  $C_p$  e por isso foi necessário realizar novas simulações para verificar até que ponto a malha influencia no valor do coeficiente de potência.

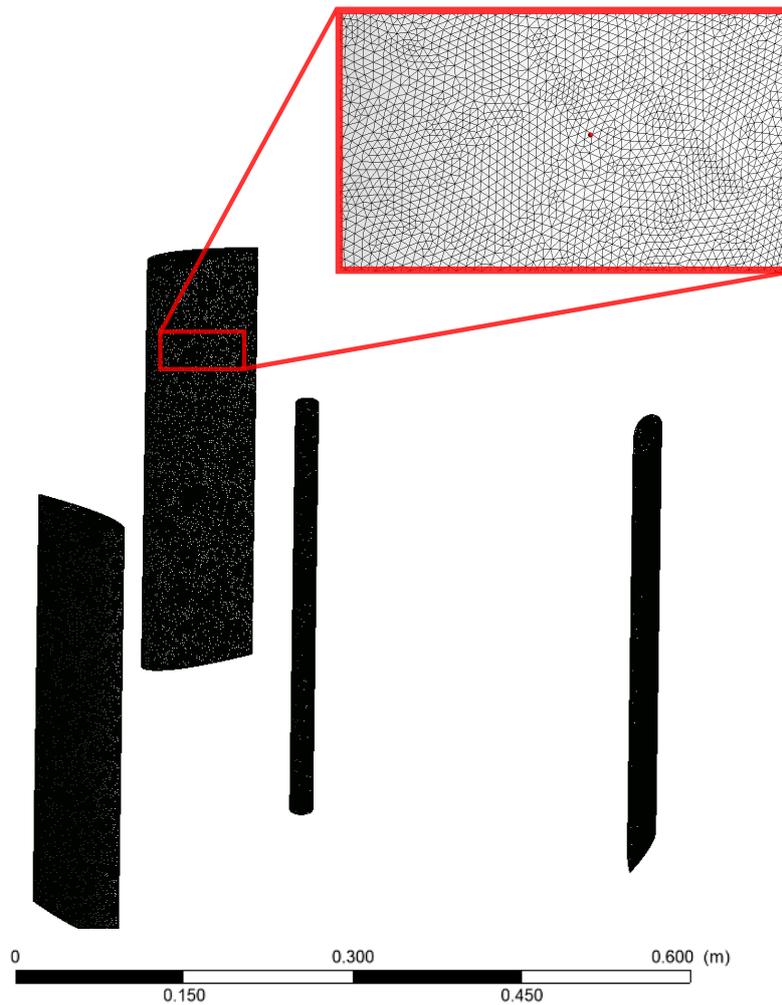


Figura 2.4 – Representação da malha na parede da pá da turbina.

Primeiramente, aplicou-se um alto grau de refinamento na malha superficial do rotor, especialmente nas pás da turbina, como pode ser visto na Figura 2.4. Isso é fundamental, pois essa região sofre um alto nível de pressão devido à interação do escoamento com as pás. Além disso, várias camadas de elementos prismáticos foram aplicadas para capturar com precisão os efeitos causados pelas tensões de cisalhamento e gradientes de pressão na camada limite com mostra a Figura 2.5.

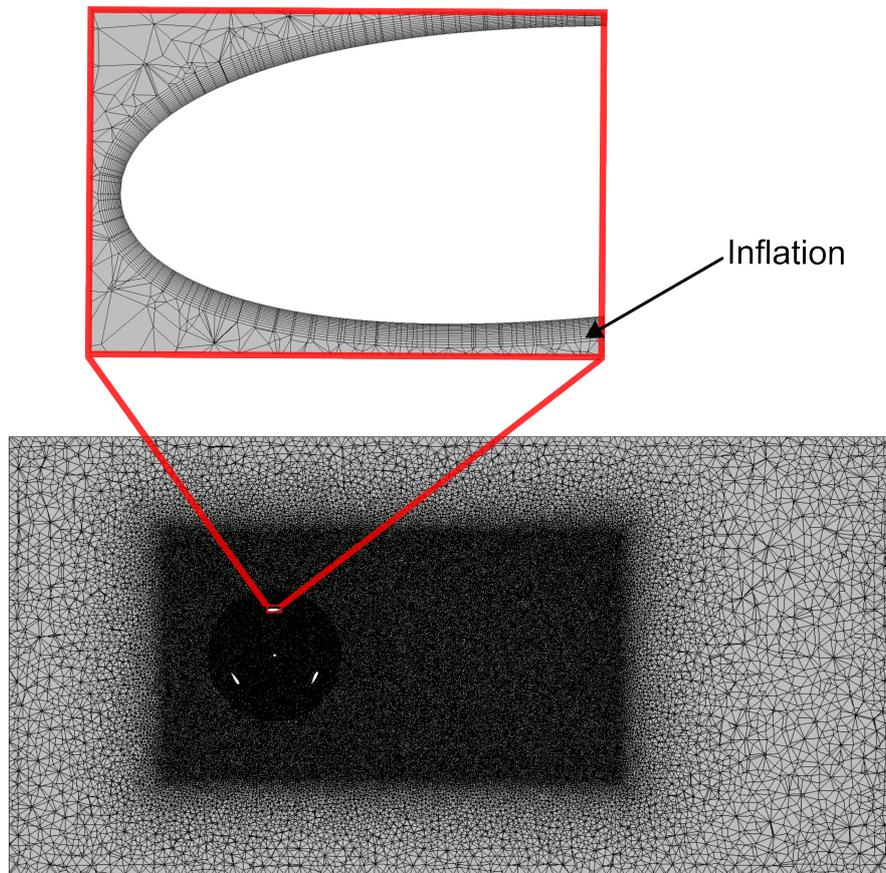


Figura 2.5 – Refinamento da malha nos domínios com aplicação de elementos prismáticos ao redor pás (Inflation).

É importante destacar que as tensões de cisalhamento estão diretamente relacionadas às forças produzidas sobre as pás do rotor, enquanto os fenômenos derivados da ação do campo de pressão na camada limite criam instabilidades nesta região, levando ao colapso do escoamento próximo à parede. Esse colapso pode afetar não só o torque total produzido, mas também a ocorrência de estol e a geração de vórtices na esteira do rotor.

Conforme apontado por (MOSHFEGHI; SONG; XIE, 2012), o refinamento a jusante da turbina também pode influenciar o valor da potência total gerada, devido à existência de um gradiente de pressão e velocidade elevados na região, ocasionado pela esteira aerodinâmica da turbina. A figura 2.5 ilustra a melhoria de refinamento nessa região.

Após refinar a turbina, foi realizado refinamento na região da esteira da turbina e na região de contato entre o domínio rotativo e o estacionário. No resto do domínio estático, não foi aplicado um refinamento. A Tabela 4 apresenta o conjunto de malhas usadas para executar o estudo de convergência de malha. Os parâmetros mais relevantes foram o valor do coeficiente de potência, para validação, e o valor médio do  $y^+$  para toda malha, importante para o modelo de turbulência SST. A malha escolhida para realizar as simulações foi a três.

Tabela 4 – Estudo de convergência de malha.

Malha	Número de Nós		$C_p$	$y^+$
	Domínio Rotativo	Domínio Estático		
1	1696915	119071	0,14	1,12
2	2139553	1462203	0,165	1
3	6257816	2667829	0,224	1,33
4	6257816	4331106	0,225	1,30

## 2.4 Efeito do incremento azimutal

Após definir a malha que será utilizada nas simulações, é importante avaliar o efeito do incremento azimutal para as simulações de turbinas eólicas. Em geral, o passo de tempo é definido em número de graus de rotação da turbina. Estudos sobre simulações URANS de VAWT's identificaram que essas simulações são altamente sensíveis ao incremento azimutal (REZAEIHA; MONTAZERI; BLOCKEN, 2018; SIDDIQUI et al., 2021; HANSEN; MAHAK; TZANAKIS, 2021), especialmente em baixos valores de  $TSR$ . Isso se deve ao fato de que o ângulo de ataque das pás da turbina varia significativamente, causando o fenômeno de estol dinâmico. Qualquer alteração nas características geométricas e operacionais pode levar a um comportamento diferente na separação do escoamento. Portanto, um incremento azimutal de  $0.1^\circ$  é uma escolha segura para essas simulações (REZAEIHA; MONTAZERI; BLOCKEN, 2018). Para obter um incremento azimutal de  $0,1^\circ$ , um passo de tempo de  $6 \times 10^{-5}$  segundos foi aplicado.

## 2.5 Simulação da turbina com uma pá

Nesta seção, realizou-se uma simulação da turbina H-Darrieus, para os dois ângulos de inclinação analisados, com apenas uma pá para analisar sua interação com a esteira que ela mesma cria. Os domínios estático e rotativo mantiveram as dimensões apresentadas na figura 2.1. As condições de contorno, que incluem velocidade, parede, rotor-estator transiente e de saída, seguiram os padrões apresentados na figura 2.2. A malha utilizada, representada na figura 2.6, apresentou a mesma densidade de elementos, mas com uma redução na quantidade de nós para 6 milhões, devido à presença de apenas uma pá.

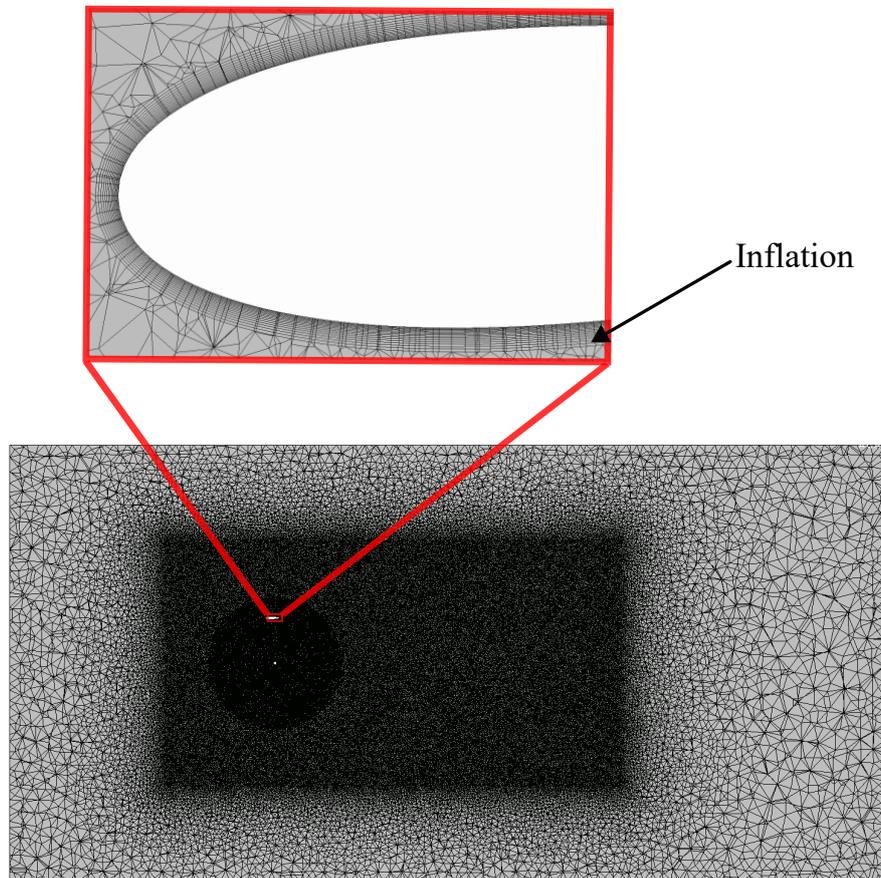


Figura 2.6 – Refinamento da malha nos domínios com inflation aplicado à turbina com uma pá.

## 3 RESULTADOS

Os principais objetivos do presente estudo são verificar qual é a influência da esteira de vorticidade de uma pá no escoamento ao redor de outra pá do rotor; Identificar as diferenças entre as interações entre os casos com os ângulo de inclinação de  $0^\circ$  e  $-5^\circ$ ; Entender a correlação entre o estol dinâmico e a geração de torque nas pás. Para isso, foram analisadas as curvas obtidas usando as simulação numéricas da turbina com três pás e a simulação da turbina com apenas uma pá e os campos de velocidade, pressão, vorticidade e a tensão de cisalhamento na face da pá.

A Figura 3.1 apresenta o desenvolvimento do torque da turbina para cada interações até o ponto em que a simulação começa a entrar no período permanente. São necessárias quatro revoluções completas da turbina para ultrapassar o período transiente, o que corresponde a aproximadamente 900 horas de simulação por núcleo de processamento computacional. Nas análises dos resultados a parte do período transiente é descartada devido as flutuações que ocorrem nesse período.

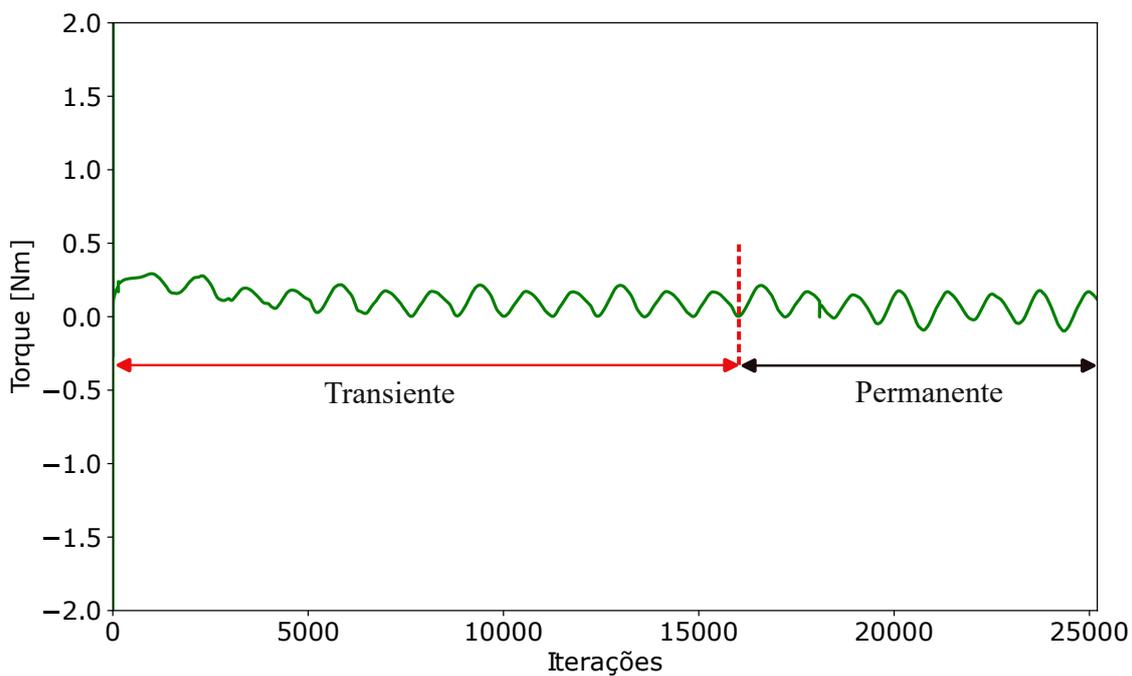


Figura 3.1 – Gráfico mostra a curva de torque da turbina para cada iteração. (—) região com período transiente; (—) região com período permanente.

### 3.1 Influência do ângulo de inclinação nas interações aerodinâmicas

A Figura 3.2 apresenta o torque de uma pá em função da sua posição azimutal, desconsiderando o período transiente inicial, ao longo da sétima revolução da turbina para os ângulos de inclinação de  $0^\circ$  e  $-5^\circ$ . O ponto inicial da curva, com posição azimutal igual à  $0^\circ$  e a pá analisada completamente alinhada com o escoamento, como mostra o encarte na Figura 3.2.

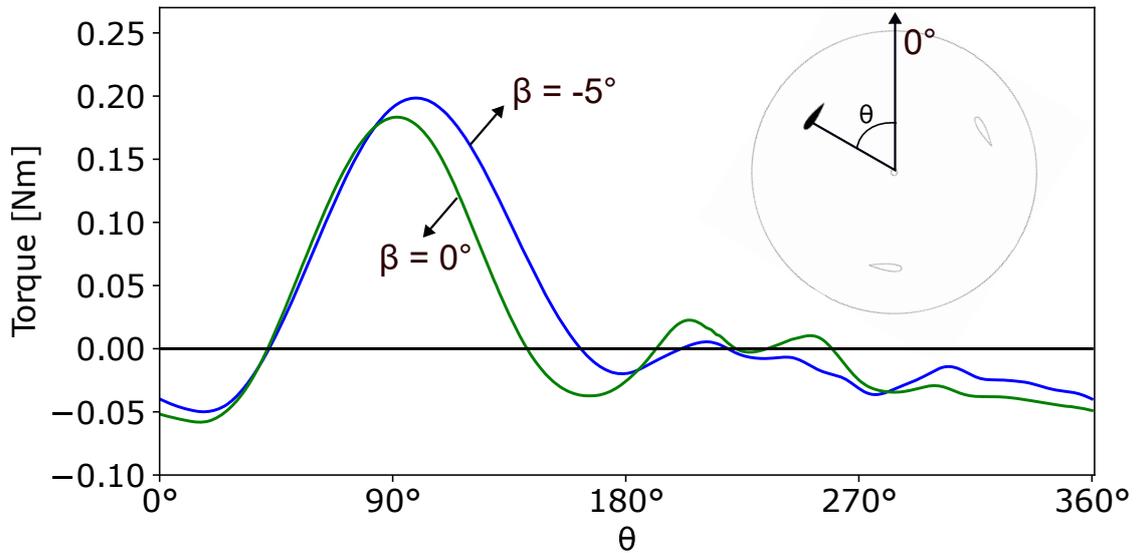


Figura 3.2 – Gráfico com comparação dos valores de torque de uma pá para cada posição azimutal durante uma rotação da turbina com inclinação de  $0^\circ$  e  $-5^\circ$ . (—) torque de uma pá com inclinação de  $0^\circ$ ; (—) torque de uma pá com inclinação de  $-5^\circ$ .

A pá com ângulo de inclinação de  $0^\circ$ , produz torque médio de  $0,014 \text{ N}\cdot\text{m}$  por revolução, com o rotor tendo um  $C_p = 0,22$ . A seção azimutal de maior relevância para a geração de torque da pá abrange as posições entre  $43^\circ$  e  $143^\circ$ , com intervalo de  $100^\circ$ . Em adição, há duas outras seções azimutais secundárias de torque positivo, posição de  $193^\circ$  a  $224^\circ$  e de  $236^\circ$  a  $261^\circ$ . No entanto, nas demais seções azimutais, o torque assume valores negativos, indicando que a pá precisa ser impulsionada para movimentar-se no escoamento.

A pá com ângulo de inclinação de  $-5^\circ$  apresenta uma seção principal de geração de torque no intervalo, abrangendo as posições azimutais de  $43^\circ$  a  $163^\circ$ , com um intervalo de  $120^\circ$ . Este ângulo de inclinação proporciona um aumento de  $20^\circ$  na seção principal de geração de torque quando comparado com a pá tendo ângulo de inclinação igual à  $0^\circ$ . Ao contrário da pá com inclinação de  $0^\circ$ , a pá com inclinação de  $-5^\circ$  não apresenta seções secundárias de geração de torque significativas. Surpreendentemente, o torque médio gerado durante uma única revolução com inclinação de  $-5^\circ$  atinge  $0,024 \text{ N}\cdot\text{m}$ , representando um aumento expressivo de  $71\%$  em relação ao observado para inclinação de  $0^\circ$ , e o rotor atinge um  $C_p$  de  $0,27$ . É

relevante observar que esse incremento substancial ocorre mesmo na ausência de seções secundárias de geração de torque.

Para compreender quais fenômenos do escoamento tem correlação com as variações observadas nas curvas de torque foi feito uma análise abrangente, que inclui o campo de vorticidade na direção  $z$ , campo de pressão, tensão de cisalhamento na superfície da pá e a velocidade próximo à superfície da pá. A Figura 3.3 apresenta o plano em que os campos de pressão e vorticidade são analisados.

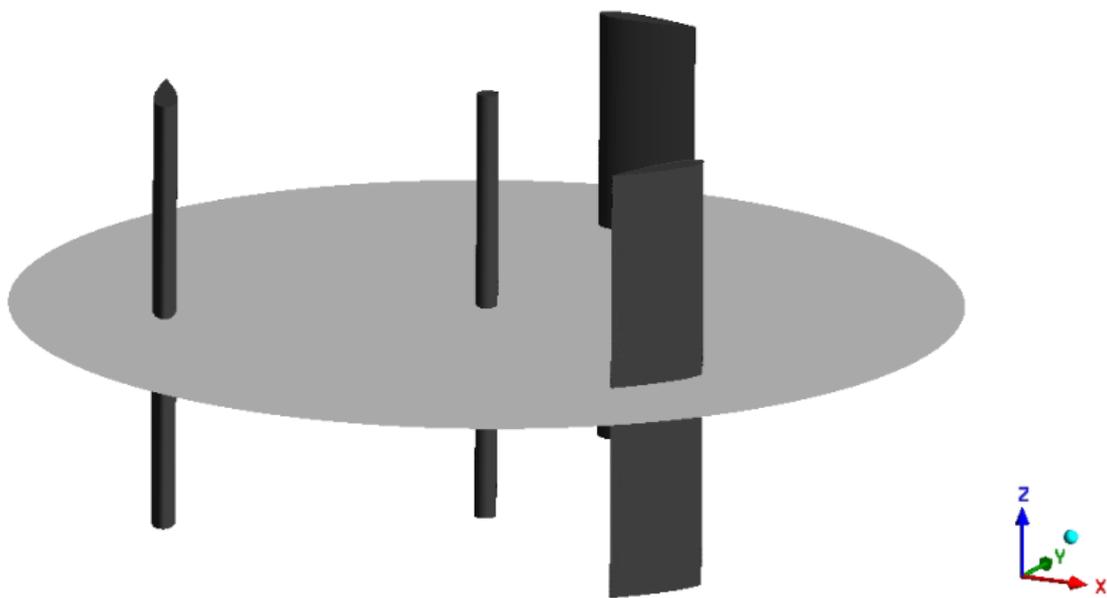


Figura 3.3 – Plano  $XY$  utilizado para análise dos resultados.

A Figura 3.4 mostra os campos de vorticidade para a componente  $z$  para o rotor com inclinações de  $0^\circ$  (Figura 3.4 (a)) e  $-5^\circ$  (Figura 3.4 (b)). Já a Figura 3.5 mostra os campos de pressão estática no escoamento, também para as inclinações de  $0^\circ$  (Figura 3.5 (a)) e  $-5^\circ$  (Figura 3.5(b)). A pá de referência é a pá de cor preta, que está na posição azimutal igual à  $99^\circ$ , dentro da faixa primária de geração de torque das pás para as duas turbinas. Analisando inicialmente a vorticidade ( Figura 3.4), em ambos os valores de  $\beta$  é possível verificar que as regiões de vorticidade negativa no extradorso das pás é muito delgada, indicando que as camadas limites nessas

regiões são finas e aderidas à superfície da pá. A região de vorticidade positiva, no intradorso das pás, apesar de consideravelmente mais espessa nos dois casos, também indica uma região de confinamento da vorticidade próximo à superfície sólida da pá, o que permite concluir que também no intradorso as camadas limites estão aderidas. Camadas limites aderidas às superfícies caracterizam um aerofólio sem regiões de separação da camada limite, sobre o qual possivelmente atua uma força de sustentação, produzida pelo mecanismo aerodinâmico clássico, originado da diferenças de pressão estática nas superfícies do aerofólio em um escoamento irrotacional sem circulação, como ordinariamente se vê em asas aeronáuticas durante o voo. De fato, a Figura 3.5 indica uma diferença importante de pressão estática entre as faces da pá. Isso permite concluir que na seção primária, o mecanismo responsável pela geração de torque é a força de sustentação sobre a pá é o mecanismo clássico de geração de sustentação em um aerofólio com ângulo de ataque não nulo, em um escoamento essencialmente potencial.

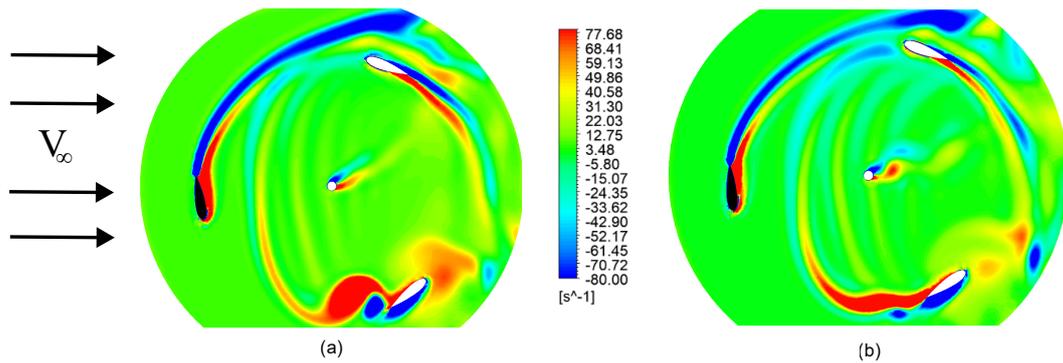


Figura 3.4 – Campo de vorticidade na direção  $z$  na posição azimutal  $99^\circ$ . (a) inclinação  $0^\circ$ ; (b) inclinação  $-5^\circ$ .

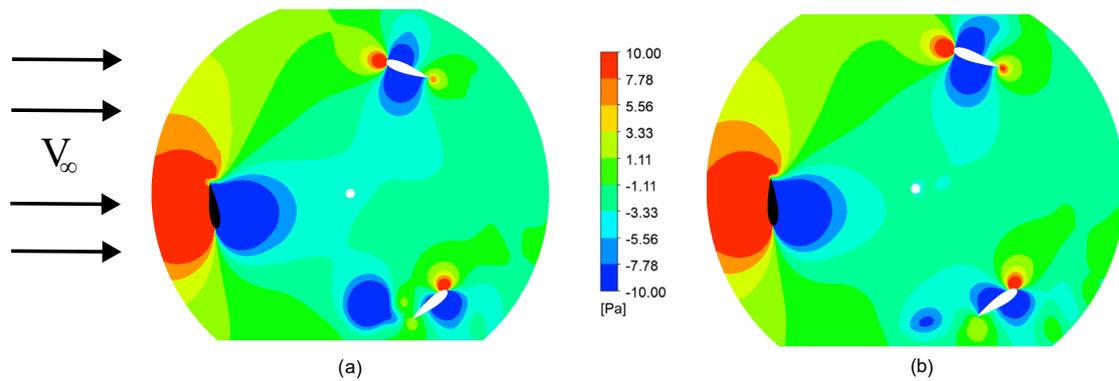


Figura 3.5 – Campo de pressão na posição azimutal  $99^\circ$ . (a) Inclinação  $0^\circ$ ; (b) Inclinação  $-5^\circ$ .

A Figura 3.6 mostra parte da curva de torque com os campos de vorticidade nos ângulos azimutais em que o torque é nulo (final da seção primária) e também para ângulos azimutais em que ocorre a inflexão da curva de torque, após a seção primária. É possível verificar que a espessura da camada limite do intradorso no caso da inclinação de  $0^\circ$  é maior do que no caso com a inclinação de  $-5^\circ$ , no ângulo em que o torque é nulo. Já no ângulo de inflexão da curva, para o caso com inclinação de  $0^\circ$ , a camada limite está na iminência do colapso, em contraste com o que se vê para inclinação de  $-5^\circ$ , que mesmo no ponto de inflexão ainda apresenta camadas limites relativamente bem aderidas à superfície da pá. Essa diferença no comportamento das camadas limites parece estar associada às diferenças nas curvas de torque, especialmente no atraso que se percebe para a ocorrência dos pontos de inflexão na seção primária, da curva para  $\beta = -5^\circ$  em relação à curva de  $\beta = 0^\circ$ .

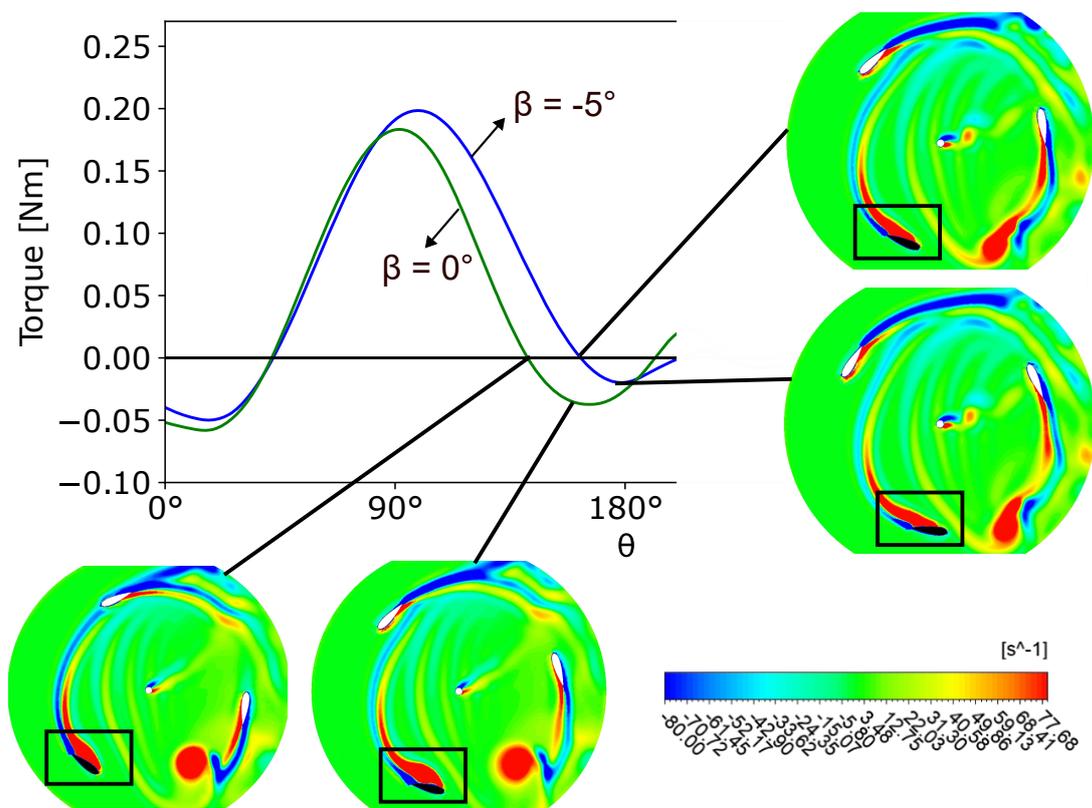


Figura 3.6 – Comparação da espessura da camada limite para para ângulos azimutais em que o torque é nulo (final da seção primária) e pontos de inflexão após a seção primária.

No caso do rotor com inclinação de  $0^\circ$ , percebemos que há uma segunda fase de produção de torque no ciclo de rotação da turbina (seção secundária), com dois picos com valores positivos. O primeiro pico, que acontece na posição azimutal de  $205^\circ$ , ocorre associado à liberação de uma grande região de recirculação positiva, junto a um pequeno vórtice de sinal negativo, como é típico do estol dinâmico em turbinas verticais, como pode ser observado na (Figura 3.7 (a)), o mesmo fenômeno não acontece para o caso com inclinação de  $-5^\circ$  (Figura 3.7 (b)). Naturalmente, o mecanismo de produção de sustentação (e, conseqüentemente, torque) nessa etapa do ciclo não é o mecanismo clássico aerodinâmico, uma vez que as camadas limites estão colapsadas. Considerando o padrão do escoamento, consideramos que seja plausível que a sustentação nesse caso se origine no efeito Weis-Fogh, e seja fortemente relacionada com a circulação ao redor do aerofólio, como ensina o

teorema de Kutta-Joukowski. Falaremos sobre o segundo pico de torque positivo no caso com inclinação de  $0^\circ$  mais adiante no texto, ainda nessa seção.

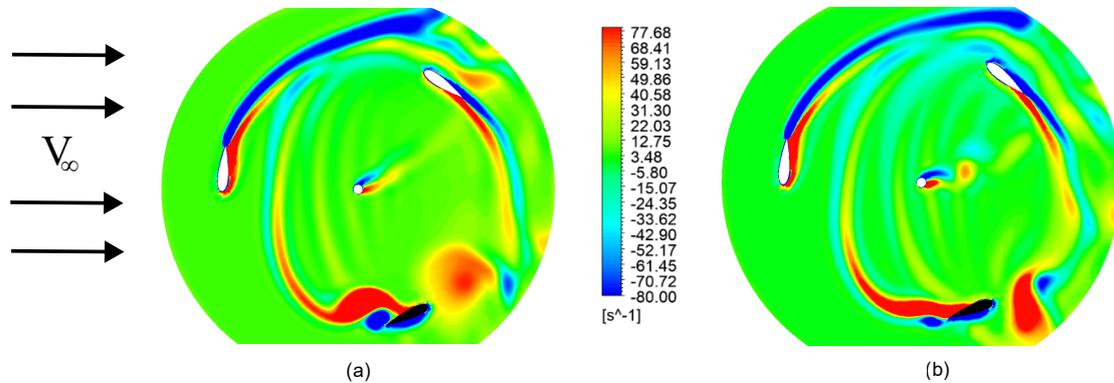


Figura 3.7 – Campo de vorticidade na direção  $z$  na posição azimutal  $205^\circ$ . (a) inclinação  $0^\circ$ ; (b) inclinação  $-5^\circ$ .

A Figura 3.8 mostra os vetores da tensão de cisalhamento, lado esquerdo, e as linhas de corrente coloridas de acordo com a velocidade, lado direito, para o rotor com inclinação de  $0^\circ$  (Figura 3.8 (a)) e  $-5^\circ$  (Figura 3.8 (b)). A pá de referência está na posição azimutal de  $205^\circ$ , no primeiro pico, da região secundária de torque para turbina com inclinação de  $0^\circ$ . Analisando a pá com inclinação de  $0^\circ$ , nota-se uma região com tensão de cisalhamento e velocidade nula na pá. De acordo com Sears (1956), quando ocorre essa combinação de fatores pode-se considerar que ocorreu o fenômeno de separação da camada limite. Para o caso com inclinação de  $-5^\circ$ , a região de separação é mais ampla, o que pode causar flutuações maiores nas forças aerodinâmicas, potencialmente levando a um aumento na produção de ruído e da vibração. Adicionalmente, a pá com inclinação de  $0^\circ$  tem duas regiões no bordo de fuga que o arrasto viscoso auxilia o movimento. Esse fenômeno pode estar associado ao efeito Weis-Fogh.

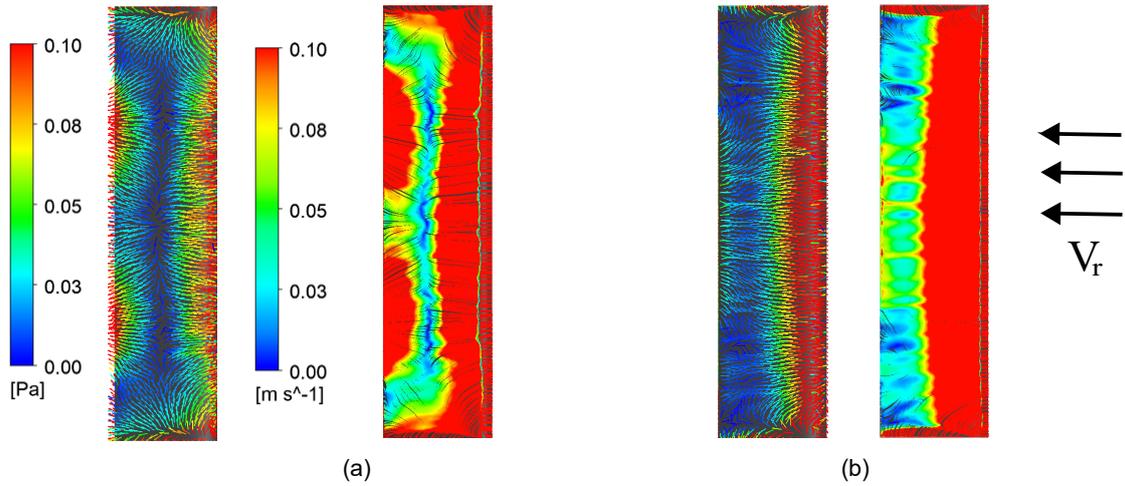


Figura 3.8 – Representação da tensão de cisalhamento na parede da pá em vetores, lado esquerdo, linhas de corrente, que representam a velocidade, tendo como referencial o observador acompanhando a pá, lado direito. Para região do extradorso. Na posição azimutal  $205^\circ$ . (a) inclinação de  $0^\circ$ ; (b) inclinação de  $-5^\circ$

A interação entre as pás e a esteira de vorticidade pode ter um papel relevante na geração de potência, especialmente fora da região primária de torque positivo. Para os ângulo de inclinação de  $0^\circ$  e  $-5^\circ$ , as pás não interagem diretamente com a esteira de vorticidade ao longo de toda a seção azimutal primária de geração de torque. Dessa forma, concluímos que as diferenças entre as curvas de torque nesta etapa do ciclo não são diretamente afetadas pelas esteiras. De fato, as curvas de torque são praticamente coincidentes no início das seções primárias de geração de torque, como se verifica na Figura 3.2. De igual forma, concluí-se que o fato do rotor com inclinação de  $-5^\circ$  gerar mais torque na segunda metade da seção primária se deve à pá ter maior ângulo de ataque (ver Equação A.12) nesse intervalo de posição azimutal.

Por outro lado, na posição azimutal entre  $180^\circ$  e  $270^\circ$ , as pás interagem diretamente com as esteira de vorticidade, mas de maneiras distintas para os rotores com os ângulos de inclinação de  $0^\circ$  e  $-5^\circ$ . A Figura 3.9 mostra a pá de referência para o rotor com inclinação de  $0^\circ$  (Figura 3.9 (a)) e com inclinação de  $-5^\circ$  (Figura 3.9 (b)), na posição azimutal de  $240^\circ$ . Nessa posição, a pá de referência com inclinação de  $0^\circ$  interage diretamente com a esteira de vorticidade e todo o escoamento ao

seu redor tem circulação positiva. De fato, a pá atravessa uma grande região de recirculação com vorticidade positiva que é liberada na esteira. Já para inclinação de  $-5^\circ$ , a interação da pá de referência com a esteira é bem menos intensa, e o bordo de ataque apenas tangencia a região de vorticidade positiva da esteira e a vorticidade é praticamente nula no escoamento fora das camadas limites ao redor da pá. Dessa forma, conjecturamos que o segundo pico de torque positivo para inclinação de  $0^\circ$  está também relacionado ao mecanismo de Weis-Fogh, porém dessa vez a origem da circulação é esteira de vorticidade.

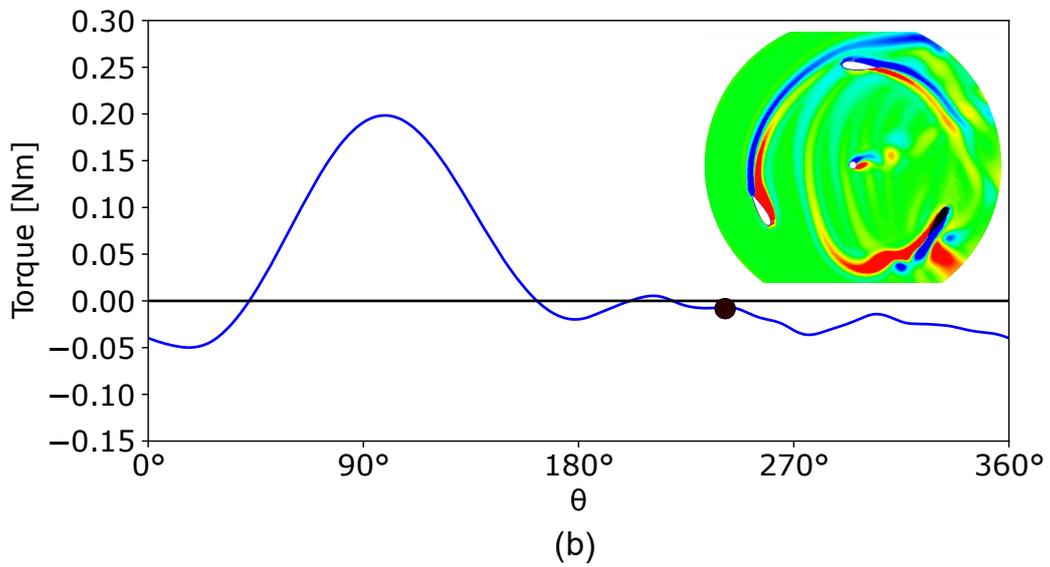
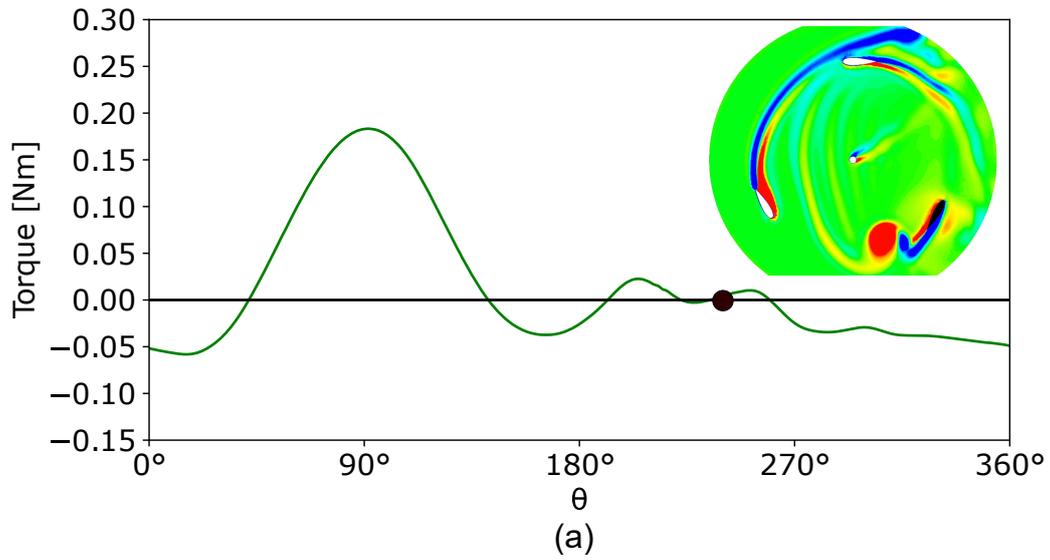


Figura 3.9 – Comparação dos contornos de vorticidade para pá de referência, na posição azimutal de  $240^\circ$ , para as inclinações de  $0^\circ$ , (a), e  $-5^\circ$ , (b). No segundo pico da seção secundária.

### 3.2 Avaliação do torque comparando a análise analítica e numérica para a turbina de três e uma pá

Com base nas análises realizadas na subseção anterior, tornou-se evidente que a interação entre uma pá e a esteira de vorticidade gerada por outra pá desempenha um papel crucial nas diferenças observadas no torque. Para esclarecer esse aspecto, na Figura 3.10, comparamos o desempenho de uma turbina equipada com apenas uma pá com o desempenho de uma turbina de três pás. Os resultados revelam que o torque médio gerado por uma única pá é de  $0,024 N \cdot m$ , superior a um terço do torque médio de  $0,037 N \cdot m$ , produzido pela turbina de três pás. Caso as pás não tivessem influência umas nas outras, espera-se que o torque gerado por uma turbina de três pás seja três vezes maior que o torque de apenas uma pá. Este não é o caso. O torque médio da turbina de três pás é reduzido devido as esteiras de vorticidade que colidem com as pás a jusante.

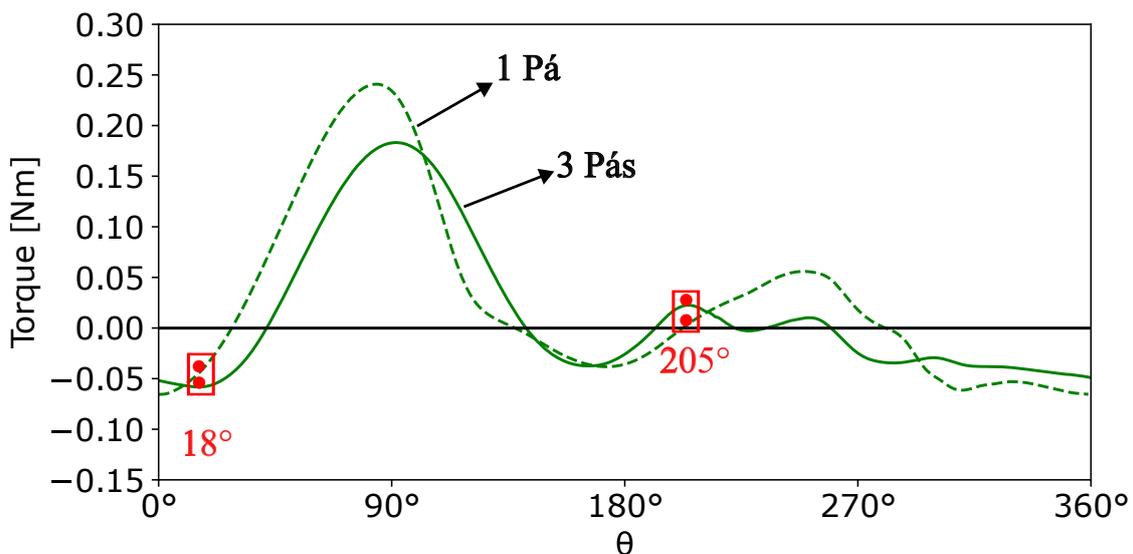


Figura 3.10 – Gráfico que representa curva de torque na pá 1 para uma rotação da turbina com ângulo de inclinação igual a  $0^\circ$ . (—) Simulação com as três pás; (---) Simulação com uma pá; (●) Pontos de divergência entre as curvas.

Os pontos de divergência destacados na Figura 3.10 foram escolhidos por

serem regiões de discrepância nos gradientes de torque entre as turbinas. Queremos observar que tipo de fenômenos ocorrem no escoamento nestas posições. A Figura 3.11, referente a posição azimutal destacada de  $18^\circ$ , apresenta os campos de vorticidade das turbinas na direção  $z$ . Nesta posição, ocorre um gradiente positivo de torque para a turbina de uma pá, enquanto que a turbina de três pás possui um gradiente negativo. Na Figura 3.11(a) é possível observar que a pá de referência, de cor preta e a  $18^\circ$ , está na esteira de vorticidade da pá a sua frente, o que não ocorre na Figura 3.11(b). Além disso a espessura da camada limite no extradorso é menor para a turbina com apenas uma pá. Esta menor espessura implica também em um menor arrasto viscoso.

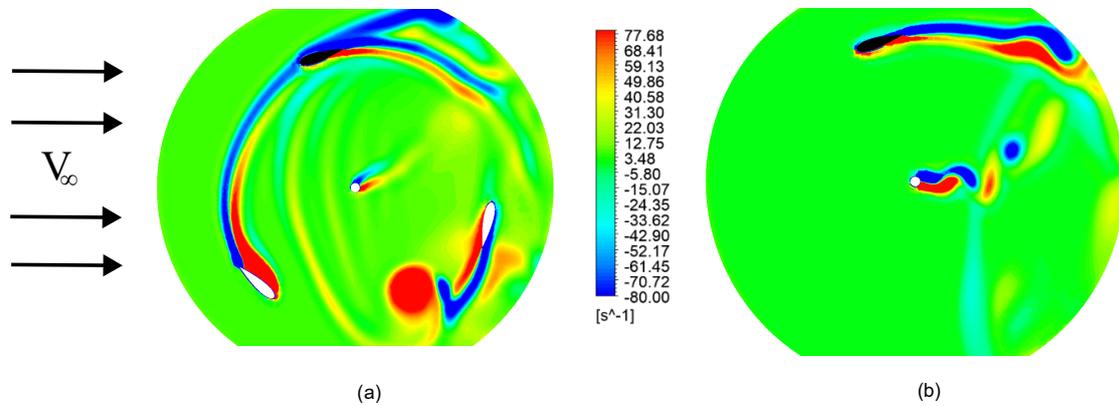


Figura 3.11 – Campo de vorticidade na direção  $z$  na posição azimutal de  $18^\circ$  para a turbina com ângulo de inclinação de  $0^\circ$ . (a) Simulação com três pás; (b) Simulação com uma pá.

Já a Figura 3.12 mostra os campos de pressão estática no escoamento para o rotor com três pás (Figura 3.12 (a)) e rotor de uma pá (Figura 3.12 (b)). A pá de referência está na posição azimutal igual à  $18^\circ$ . Analisando o campo de pressão, em ambos os casos é possível verificar que existe uma diferença no gradiente de pressão estática entre o intradorso e o extradorso da pá de referência, porém esse gradiente é visivelmente maior no caso com rotor de uma pá.. Isso permite concluir que nessa posição azimutal, o *mecanismo clássico* de geração de sustentação, também contribui para geração de torque.

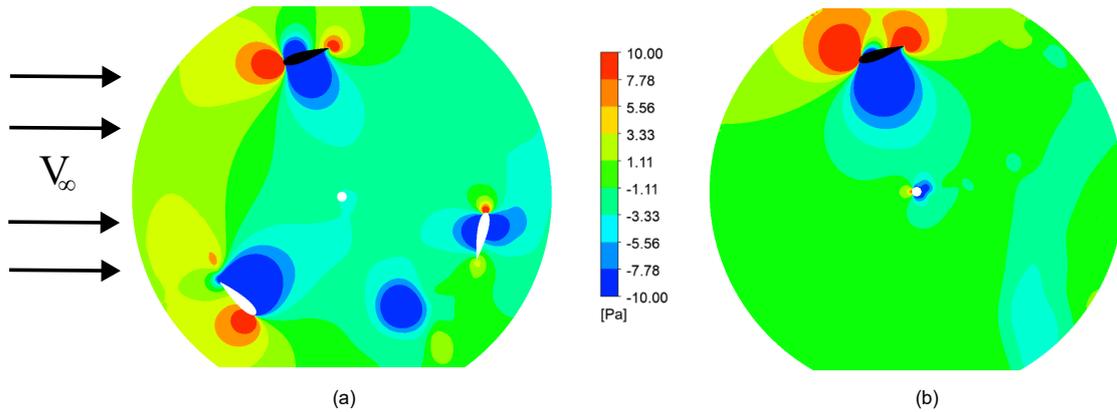


Figura 3.12 – Campo de pressão ao redor dos aerofólios na posição azimutal de  $18^\circ$ . Para as pás com ângulo de inclinação de  $0^\circ$ . (a) Simulação com três pás; (b) Simulação com uma pá.

Na fase secundária de geração de torque no ciclo de rotação da turbina, o caso com a turbina de três pás apresenta dois picos com valores positivos, porém esses picos não tem tanta importância para o contexto geral de produção de torque da pá. Em contrapartida o caso com a turbina tendo apenas uma pá, a fase secundária tem uma maior relevância para o contexto geral de geração de torque. É possível observar na Figura 3.13 que mostra os campos de velocidade na direção  $x$  para o rotor com três pás, (Figura 3.13 (a)), e uma pá (Figura 3.13 (b)). A pá de referência está na posição azimutal de  $205^\circ$ , dentro da faixa secundária de torque, no primeiro pico encontrado para o caso com três pás. Analisando inicialmente o campo de velocidade para turbina com três pás, é possível observar que a pá de referência está em uma região com baixa velocidade do escoamento, o mesmo não acontece com o caso da turbina de uma pá. Essa diferença encontrada está associada ao aumento da solidez da turbina que provoca uma redução considerável da velocidade que chega na pá de referência.

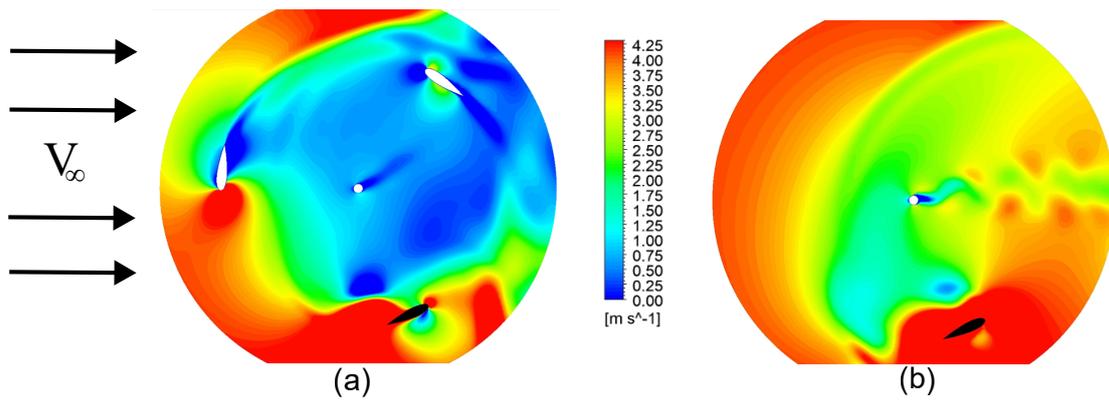


Figura 3.13 – Campo de velocidade na direção  $x$  na posição azimutal  $205^\circ$ . Para as pás com ângulo de inclinação de  $0^\circ$ . (a) Simulação com três pás; (b) Simulação com uma pá.

## 4 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo principal investigar a influência da esteira individual criada por uma pá na produção de torque de outra pá, considerando a mudança do ângulo de inclinação das pás. Todo estudo foi realizado em torno de uma pequena turbina eólica H-Darrieus com 0,6 metros de diâmetro, três pás feitas com perfil aerodinâmico NACA 0022.

As simulações realizadas empregaram a abordagem URANS com o modelo de turbulência  $\kappa - \omega$  SST. O modelo foi escolhido devido a dois fatores principais. O primeiro foi devido aos resultados promissores na previsão da liberação do vórtice de estol dinâmico. O segundo se trata da proximidade do valor encontrado para o coeficiente de potência com o valor do resultado experimental de Howell et al. (2010). Utilizando ANSYS, foram conduzidas simulações para as pás com ângulos de inclinação de  $0^\circ$  e  $-5^\circ$ , além da simulação considerando apenas uma pá. Os resultados revelaram um incremento de 22% no coeficiente de potência ao mudar o ângulo de inclinação para  $-5^\circ$ .

Ao analisar a interação aerodinâmica com as pás tendo um ângulo de inclinação de  $0^\circ$  e  $-5^\circ$  foi possível observar que a inclinação das pás desempenha um papel crucial na geração de torque. A pá com inclinação de  $-5^\circ$  demonstrou um aumento significativo de 71% no torque médio em relação à pá com inclinação de  $0^\circ$ , mesmo na ausência de seções secundárias de geração de torque. Além disso, a análise detalhada das interações entre as pás e o escoamento revelou que fenômenos como a aderência das camadas limites às superfícies das pás, o efeito Weis-Fogh e a interação com a esteira de vorticidade desempenham papéis significativos na geração de torque em diferentes partes do ciclo de rotação da turbina. Também

observou-se que para as pás com inclinação de  $-5^\circ$ , ocorreu um aumento da separação da camada limite. Esse aumento na separação pode gerar flutuações maiores nas forças aerodinâmicas, o que, por sua vez, pode levar a um aumento no ruído e na vibração da turbina.

As análises do escoamento, considerando simulações com três pás, uma pá e a estimativa teórica, aprofundaram a compreensão da interação entre a pá e a esteira gerada por outra pá, e como essa interação afeta a geração de torque da pá. Isso ocorre devido ao aumento da solidez da turbina para o caso com três pás, o que afeta a velocidade que o escoamento chega na pá, e à intensificação de alguns fenômenos já existentes no caso de uma única pá. Dentre estes fenômenos destaca-se especialmente a maior interação entre esteiras de vorticidade no rotor.

Os resultados deste estudo oferecem contribuições valiosas para a compreensão e aprimoramento das turbinas H-Darrieus. A mudança do ângulo de inclinação se mostrou capaz de impactar a produção de potência da turbina, porém, essa alteração também pode acarretar em comprometimentos na integridade estrutural. Dessa forma, ressalta-se a necessidade de abordagens cautelosas e equilibradas na busca pelo aprimoramento do desempenho e eficiência destas turbinas.

Diversas linhas de pesquisa são abertas a partir dos resultados e fundamentos estabelecidos pelo presente trabalho. Com ênfase no Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília, este trabalho marca o início de diversos estudos em turbinas de eixo vertical. Os estudos aqui apresentados sobre ângulo de inclinação nos permite aprofundar no projeto de turbinas H-Darrieus, levando em consideração um estudo sistemático de otimização, que relaciona o ângulo de inclinação com o número de pás. Não obstante, estes resultados também podem ser validados por trabalhos experimentais em túnel de vento para maior consolidação das conclusões. Seguindo isso, diversos estudos tangenciais também foram apontados, tal como a vibração proveniente da interação entre os vórtices e as pás para diversos ângulos de inclinação, mas como também a geração de ruído, promovendo e ressaltando a interdisciplinaridade da área.

# Referências

ABDALRAHMAN, G. et al. Design and implementation of an intelligent blade pitch control system and stability analysis for a small darrieus vertical-axis wind turbine. *Energies*, MDPI, v. 15, n. 1, p. 235, 2021. Quoted on page 14.

ALI, S.; JANG, C.-M. Effects of tip speed ratios on the blade forces of a small h-darrieus wind turbine. *Energies*, MDPI, v. 14, n. 13, p. 4025, 2021. Quoted on page 56.

ANSAF, R. et al. Efficiency-based design optimization of the h-type darrieus wind turbine with fixed guiding-walls. *Energy Reports*, Elsevier, v. 9, p. 3576–3592, 2023. Quoted 3 times on pages xii, 9 e 12.

ANSYS, C. Ansys cfx guide. *Ansys CFX Release*, 2021. Quoted on page 23.

ARDANEH, F. et al. Numerical analysis of the pitch angle effect on the performance improvement and flow characteristics of the 3-pb darrieus vertical axis wind turbine. *Energy*, Elsevier, v. 239, p. 122339, 2022. Quoted on page 15.

AYATI, A. A. et al. A double-multiple streamtube model for vertical axis wind turbines of arbitrary rotor loading. *Wind Energy Science*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 4, n. 4, p. 653–662, 2019. Quoted on page 11.

BHUYAN, S.; BISWAS, A. Investigations on self-starting and performance characteristics of simple h and hybrid h-savonius vertical axis wind rotors. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 87, p. 859–867, 2014. Quoted on page 2.

BUCHNER, A.-J. et al. Dynamic stall in vertical axis wind turbines: scaling and topological considerations. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 841, p. 746–766, 2018. Quoted 2 times on pages 5 e 7.

CHANDRAMOULI, S. et al. Numerical analysis of effect of pitch angle on a small scale vertical axis wind turbine. *International journal of renewable energy research*, v. 4, n. 4, p. 929–935, 2014. Quoted on page 15.

CHEN, L. et al. Vorticity dynamics of fully developed leading-edge vortices on revolving wings undergoing pitch-up maneuvers. *Physics of Fluids*, AIP Publishing, v. 35, n. 3, 2023. Quoted on page 6.

CHOUDHRY, A. et al. Methods to control dynamic stall for wind turbine applications. *Renewable energy*, Elsevier, v. 86, p. 26–37, 2016. Quoted on page 7.

CHOUDHRY, A. et al. An insight into the dynamic stall lift characteristics. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier, v. 58, p. 188–208, 2014. Quoted 2 times on pages 5 e 6.

COTON, F. et al. Helicopter tail rotor orthogonal blade vortex interaction. *Progress in Aerospace Sciences*, Elsevier, v. 40, n. 7, p. 453–486, 2004. Quoted on page 7.

DABIRI, J. O. Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays. *Journal of renewable and sustainable energy*, American Institute of Physics, v. 3, n. 4, p. 043104, 2011. Quoted on page 3.

ERIKSSON, S. et al. Evaluation of different turbine concepts for wind power. *renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 12, n. 5, p. 1419–1434, 2008. Quoted on page 3.

FELLI, M. Underlying mechanisms of propeller wake interaction with a wing. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 908, p. A10, 2021. Quoted on page 7.

FIEDLER, A. J.; TULLIS, S. Blade offset and pitch effects on a high solidity vertical axis wind turbine. *Wind engineering*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 33, n. 3, p. 237–246, 2009. Quoted on page 14.

GARDNER, A. D. et al. Review of rotating wing dynamic stall: Experiments and flow control. *Progress in Aerospace Sciences*, Elsevier, v. 137, p. 100887, 2023. Quoted on page 7.

GHASEMIAN, M. et al. A review on computational fluid dynamic simulation techniques for darrieus vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 149, p. 87–100, 2017. Quoted 3 times on pages 2, 12 e 21.

GONÇALVES, A. N. et al. Passive control of dynamic stall in a h-darrieus vertical axis wind turbine using blade leading-edge protuberances. *Applied Energy*, Elsevier, v. 324, p. 119700, 2022. Quoted on page 14.

HANSEN, J. T. et al. Numerical modelling and optimization of vertical axis wind turbine pairs: A scale up approach. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 171, p. 1371–1381, 2021. Quoted on page 28.

HAU, E. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. Quoted 4 times on pages xii, xiii, 4 e 17.

HAU, N. R. et al. A critical analysis of the stall onset in vertical axis wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, v. 204, p. 104264, 2020. Quoted on page 15.

HOWELL, R. et al. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable energy*, Elsevier, v. 35, n. 2, p. 412–422, 2010. Quoted 6 times on pages xvi, 16, 21, 25, 45 e 55.

HWANG, I. S. et al. Optimization of cycloidal water turbine and the performance improvement by individual blade control. *Applied Energy*, Elsevier, v. 86, n. 9, p. 1532–1540, 2009. Quoted on page 14.

ISLAM, M. et al. Aerodynamic models for darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 12, n. 4, p. 1087–1109, 2008. Quoted on page 10.

KAVADE, R. K.; GHANEGAONKAR, P. M. Optimisation and performance analysis of vertical axis wind turbine with blade pitching at best position angle for different tip speed ratios. *International Journal of Ambient Energy*, Taylor & Francis, v. 41, n. 7, p. 783–792, 2020. Quoted on page 14.

LARSEN, J. W. et al. Dynamic stall model for wind turbine airfoils. *Journal of Fluids and Structures*, Elsevier, v. 23, n. 7, p. 959–982, 2007. Quoted 2 times on pages xii e 6.

LIGHTHILL, M. On the weis-fogh mechanism of lift generation. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 60, n. 1, p. 1–17, 1973. Quoted on page 6.

LIU, Q. et al. Performance assessment of an innovative gurney flap for straight-bladed vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 185, p. 1124–1138, 2022. Quoted on page 13.

MAXWORTHY, T. Experiments on the weis-fogh mechanism of lift generation by insects in hovering flight. part 1. dynamics of the ‘fling’. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 93, n. 1, p. 47–63, 1979. Quoted on page 6.

- MENTER, F. Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows. In: *23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 2906. Quoted on page 24.
- MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, 1994. Quoted on page 24.
- MOHAMED, O. S. et al. Numerical investigation of darrieus wind turbine with slotted airfoil blades. *Energy Conversion and Management: X*, Elsevier, v. 5, p. 100026, 2020. Quoted on page 14.
- MOHAMMED, A. A. et al. Numerical investigation of a vertical axis wind turbine performance characterization using new variable pitch control scheme. *Journal of Energy Resources Technology*, American Society of Mechanical Engineers, v. 142, n. 3, p. 031302, 2020. Quoted on page 14.
- MOSHFEGHI, M. et al. Effects of near-wall grid spacing on sst-k- $\omega$  model using nrel phase vi horizontal axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier, v. 107, p. 94–105, 2012. Quoted on page 27.
- PARASCHIVOIU, I. *Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept*. [S.l.]: Presses inter Polytechnique, 2002. Quoted 3 times on pages 3, 11 e 12.
- PARASCHIVOIU, I. et al. H-darrieus wind turbine with blade pitch control. *International Journal of Rotating Machinery*, Hindawi, v. 2009, 2009. Quoted on page 14.
- POPE, S. B. *Turbulent flows*. [S.l.]: Cambridge university press, 2000. Quoted on page 21.
- RANJBAR, M. H. et al. Power enhancement of a vertical axis wind turbine equipped with an improved duct. *Energies*, MDPI, v. 14, n. 18, p. 5780, 2021. Quoted on page 13.
- RANKINE, W. J. M. On the mechanical principles of the action of propellers. *Transactions of the Institution of Naval Architects*, v. 6, 1865. Quoted on page 54.
- REZAEIHA, A. et al. Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Applied energy*, Elsevier, v. 197, p. 132–150, 2017. Quoted on page 15.
- REZAEIHA, A. et al. Towards accurate cfd simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence. *Energy conversion and management*, Elsevier, v. 156, p. 301–316, 2018. Quoted on page 28.

- RIBEIRO, Á. *Análise Aerodinâmica de Asas Usando o Método VLM Acoplado ao Xfoil*. 2009. Tese (Doutorado) — Universidade da Beira Interior (Portugal). Quoted on page 54.
- SCUNGIO, M. et al. Wind tunnel testing of scaled models of a newly developed darrieus-style vertical axis wind turbine with auxiliary straight blades. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 130, p. 60–70, 2016. Quoted on page 2.
- SEARS, W. Some recent developments in airfoil theory. *Journal of the Aeronautical Sciences*, v. 23, n. 5, p. 490–499, 1956. Quoted on page 37.
- SHOURANGIZ-HAGHIGHI, A. et al. State of the art in the optimisation of wind turbine performance using cfd. *Archives of Computational Methods in Engineering*, Springer, v. 27, p. 413–431, 2020. Quoted on page 12.
- SIDDIQUI, M. S. et al. A numerical investigation to analyze effect of turbulence and ground clearance on the performance of a roof top vertical-axis wind turbine. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 164, p. 978–989, 2021. Quoted on page 28.
- SILVA, J. D. da; KANIZAWA, F. T. Modeling and analysis of vertical axis turbine with pitch adjusted by an eccentric guide. *International Journal of Green Energy*, Taylor & Francis, v. 20, n. 3, p. 325–337, 2023. Quoted on page 14.
- SMITH, H.; SCHNEIDER, J. Wind tunnel tests of the aerodynamic effects of flap gap seals on light aircraft. In: *Aircraft Engineering, Technology, and Operations Congress*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 3973. Quoted on page 10.
- SUN, X. et al. Rotation improvement of vertical axis wind turbine by offsetting pitching angles and changing blade numbers. *Energy*, Elsevier, v. 215, p. 119177, 2021. Quoted on page 15.
- SYAWITRI, T. P. et al. Geometry optimisation of vertical axis wind turbine with gurney flap for performance enhancement at low, medium and high ranges of tip speed ratios. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Elsevier, v. 49, p. 101779, 2022. Quoted on page 13.
- TEMPLIN, R. *Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine*. [S.l.], 1974. Quoted 2 times on pages 10 e 11.
- VITERNA, L. A.; JANETZKE, D. C. *Theoretical and experimental power from large horizontal-axis wind turbines*. [S.l.], 1982. Quoted on page 55.
- WANG, X. H. et al. Performance evaluation of a downwind diffuser on vertical axis wind turbine. *International Journal of Energy Research*, Wiley Online Library, v. 46, n. 1, p. 351–369, 2022. Quoted on page 13.

- WEIS-FOGH, T. Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production. *Journal of experimental Biology*, The Company of Biologists Ltd, v. 59, n. 1, p. 169–230, 1973. Quoted on page 6.
- WILBERFORCE, T.; ALASWAD, A. Performance analysis of a vertical axis wind turbine using computational fluid dynamics. *Energy*, Elsevier, v. 263, p. 125892, 2023. Quoted 3 times on pages xii, 9 e 12.
- WILCOX, D. C. et al. *Turbulence modeling for CFD*. [S.l.]: DCW industries La Canada, CA, 1998. v. 2. Quoted 2 times on pages 19 e 20.
- WILSON, R. E. et al. *Aerodynamic performance of wind turbines, energy research and development administration*. [S.l.], 1976. Quoted on page 11.
- XU, W. et al. High-resolution numerical investigation into the effects of winglet on the aerodynamic performance for a three-dimensional vertical axis wind turbine. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 205, p. 112333, 2020. Quoted on page 14.
- YAKHOT, V. et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, American Institute of Physics, v. 4, n. 7, p. 1510–1520, 1992. Quoted on page 24.
- ZADEH, S. N. et al. Mesh convergence study for 2-d straight-blade vertical axis wind turbine simulations and estimation for 3-d simulations. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, v. 38, n. 4, p. 487–504, 2014. Quoted on page 25.
- ZHANG, T.-t. et al. Winglet design for vertical axis wind turbines based on a design of experiment and cfd approach. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 195, p. 712–726, 2019. Quoted 2 times on pages xii e 10.
- ZHAO, Z. et al. Variable pitch approach for performance improving of straight-bladed vawt at rated tip speed ratio. *Applied Sciences*, MDPI, v. 8, n. 6, p. 957, 2018. Quoted on page 14.
- ZIDANE, I. F. et al. Effect of upstream deflector utilization on h-darrieus wind turbine performance: An optimization study. *Alexandria Engineering Journal*, Elsevier, v. 63, p. 175–189, 2023. Quoted 3 times on pages xii, 9 e 12.

## Apêndices

# A Metodologia para estimativa do torque teórico

Neste capítulo, é desenvolvida uma metodologia para estimativa do torque teórico gerado por uma pá da turbina H-Darrieus, levando em consideração o ângulo de ataque e a sua posição azimutal para ângulos de inclinação de  $0^\circ$  e  $-5^\circ$ . Para o cálculo teórico, utilizou-se o modelo de escoamento invíscido, que assume um fluido ideal. Os coeficientes de sustentação ( $C_l$ ) e arrasto ( $C_d$ ) do perfil aerodinâmico simétrico NACA 0022, é o perfil utilizado nas pás da turbina, foram obtidos por meio do programa X-FOIL. O X-FOIL faz uso do método dos painéis acoplado a uma formulação de camada limite para sua determinação (RIBEIRO, 2009). Com base nesses dados, foi feita a estimativa do torque teórico gerado por uma pá para os ângulos de inclinação analisados.

De acordo com a teoria do disco atuador de Rankine (1865) a velocidade do escoamento à medida que ele se aproxima da turbina é influenciada pela presença da própria turbina. Essa diferença existe, pois a turbina realiza um bloqueio no escoamento, resultando em uma diminuição da velocidade em relação ao escoamento livre. A velocidade induzida pela turbina ( $V_a$ ) pode ser calculada como

$$V_a = V_a(1 - a), \quad (\text{A.1})$$

em que  $a$  é o fator de indução e pode ser calculado como através da sua relação com o coeficiente de potência,

$$C_p = 4a(1 - a)^2. \quad (\text{A.2})$$

Como já temos conhecimento prévio do  $C_p$  por meio do trabalho experimental de Howell et al. (2010), podemos estimar o fator de indução em 0.75 para os cálculos do torque teórico.

Para determinar os valores de  $C_l$  e  $C_d$ , é necessário conhecer o número de Reynolds, definido como

$$Re = \frac{\rho c V_a}{\mu}, \quad (\text{A.3})$$

em que  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $c$  é a corda do aerofólio,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido e  $V_a$  é a velocidade induzida do escoamento.

A curva polar na Figura A.1 representa a relação entre  $C_l$  e o ângulo de ataque ao longo de uma faixa completa de  $360^\circ$ , obtida por meio da extrapolação Viterna, que é um modelo de pós estolamento utilizado para extrapolar os coeficiente aerodinâmicos (VITERNA; JANETZKE, 1982).

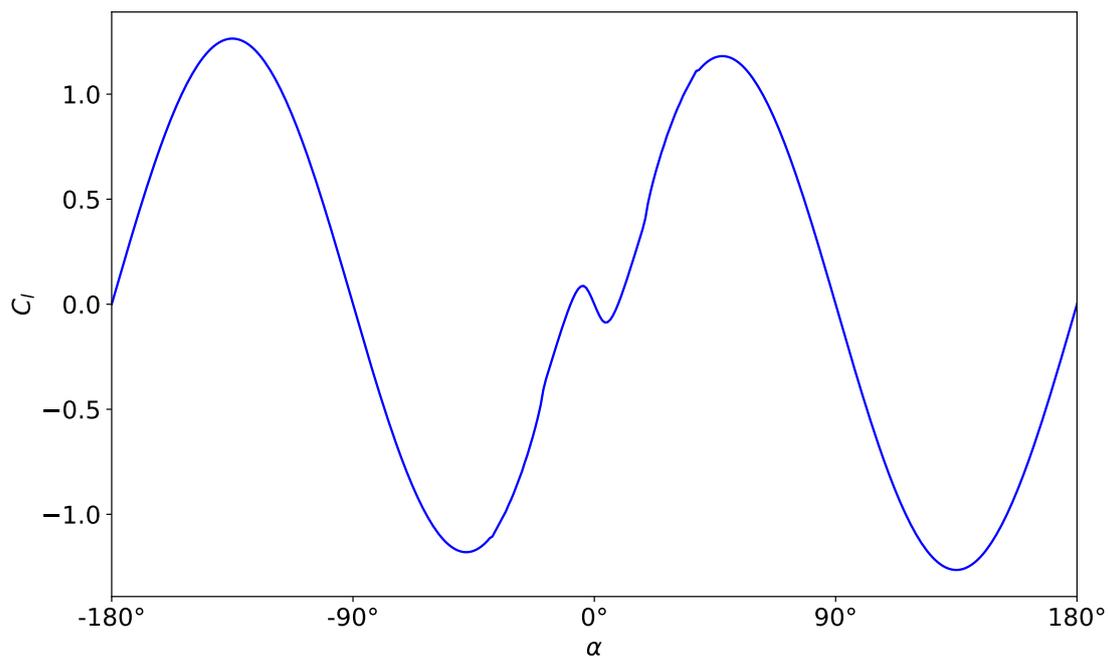


Figura A.1 – Curva polar  $C_l \times \alpha$ .

O  $TSR$  definido como

$$TSR = \frac{V_t}{V_a}, \quad (\text{A.4})$$

em que  $V_t = R\omega$ , sendo  $\omega$  a velocidade angular do rotor em rad/s, representa a velocidade tangencial. O  $TSR$  é um parâmetro crucial para definir o ângulo de ataque da pá, uma vez que o ângulo de ataque varia com o valor do  $TSR$ . Essa variação do ângulo de ataque é um dos principais fatores que influenciam o desempenho das VAWTs (ALI; JANG, 2021).

Para calcular o ângulo de ataque em cada posição azimutal  $\theta$ , é necessário estabelecer a formulação adequada. Para isso definimos o vetor velocidade tangencial, que tem como ponto de referência o observador em movimento com a pá, ( $\mathbf{V}_t$ ) e o vetor velocidade do escoamento não perturbado ( $\mathbf{V}_a$ ) que podem ser definidos como

$$\mathbf{V}_t = \omega R(\sin \theta, -\cos \theta) \quad (\text{A.5})$$

e

$$\mathbf{V}_a = V_a(1, 0). \quad (\text{A.6})$$

Após definir os vetores das velocidades é feito um somatório das duas velocidades para encontrar a velocidade de incidência na pá ( $\mathbf{V}_r$ ). Como resultado temos  $\mathbf{V}_r$  igual a

$$\mathbf{V}_r = (\omega R \sin \theta + \omega R \cos \theta, \omega R \cos \theta) = V_a(1 + TSR \sin \theta, -TSR \cos \theta). \quad (\text{A.7})$$

Para determinar o ângulo de ataque ( $\alpha$ ), calculamos o ângulo entre o vetor  $\mathbf{V}_r$  e a direção tangente à pá, considerando um observador localizado na própria pá. O vetor da direção tangente é representado por  $-\hat{e}_\theta = (\sin \theta, -\cos \theta)$ . Em seguida, utilizamos o produto escalar entre os vetores  $\mathbf{V}_r$  e  $-\hat{e}_\theta$  para encontrar o ângulo de ataque. No entanto, é importante ressaltar que apenas o vetor  $-\hat{e}_\theta$  é normalizado. Dessa forma, obtemos o vetor normalizado  $\hat{V}_r$  por meio da equação descrita como

$$\hat{V}_r = \frac{\mathbf{V}_r}{\|\mathbf{V}_r\|}, \quad (\text{A.8})$$

em que  $\|\mathbf{V}_r\|$  é a norma do vetor  $\mathbf{V}_r$ , dada por

$$\|\mathbf{V}_r\| = \mathbf{V}_a \sqrt{1 + TSR^2 + 2TSR \sin \theta}. \quad (\text{A.9})$$

Portanto,  $\hat{V}_r$  é

$$\hat{V}_r = [(1 + TSR^2 + 2TSR \sin \theta)^{-\frac{1}{2}}(TSR + \sin \theta)]. \quad (\text{A.10})$$

Ao realizar o produto escalar entre os dois vetores encontra-se que

$$\cos \alpha = (1 + TSR^2 + 2TSR \sin \theta)^{-\frac{1}{2}}(TSR + \sin \theta). \quad (\text{A.11})$$

Assim, é possível definir a expressão para calcular o ângulo de ataque para cada posição azimutal, que é

$$\alpha = \cos^{-1}[(1 + TSR^2 + 2TSR \sin \theta)^{-\frac{1}{2}}(TSR + \sin \theta)] - \beta. \quad (\text{A.12})$$

A Figura A.2 mostra as posições em que o ângulo de inclinação é maior ou menor que zero.

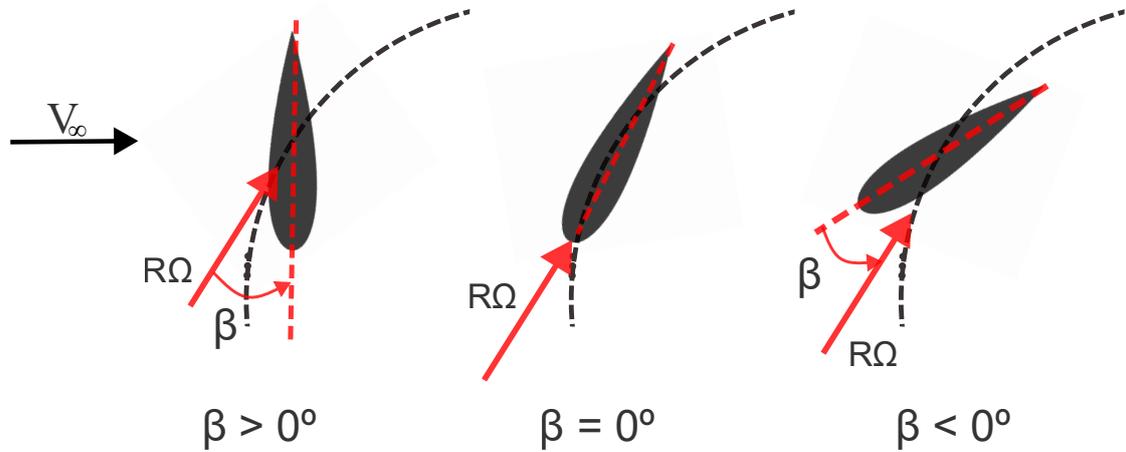


Figura A.2 – Representação esquemática de uma pá com três diferentes ângulos de inclinação: positivo, negativo e zero.

Após obter a curva polar do perfil, como mostrado na Figura A.1 e o valor da velocidade incidente para cada posição azimutal, podemos calcular as forças de arrasto ( $F_d$ ) e sustentação ( $F_l$ ) utilizando as seguintes equações

$$F_d = \frac{1}{2}\rho AC_d \hat{V}_r^2 \quad (\text{A.13})$$

e

$$F_l = \frac{1}{2}\rho AC_l \hat{V}_r^2, \quad (\text{A.14})$$

tendo  $A$  como a área projetada perpendicularmente à direção do vento.

Com o cálculo das forças de sustentação e arrasto, podemos determinar a força tangencial ( $F_t$ ), representada na Figura 1.5 d, que é responsável pela geração do torque da turbina:

$$F_t = F_l \sin \alpha - F_d \cos \alpha. \quad (\text{A.15})$$

A estimativa do torque teórico de uma pá para uma turbina H-Darrieus é expressa por

$$T = F_t R. \quad (\text{A.16})$$

A Figura A.3 exhibe a comparação do torque gerado por uma pá, a evolução do ângulo de ataque e a posição azimutal da pá com ângulo de inclinação de  $-5^\circ$ , representado pelas linhas tracejadas, e uma pá com inclinação de  $0^\circ$ , representados pelas linhas sólidas. Ao analisar o gráfico observa-se que o ângulo de ataque alcançou valores máximos de  $32,2^\circ$  e mínimos de  $-32,3^\circ$  para o inclinação de  $0^\circ$ . No caso do inclinação de  $-5^\circ$ , os valores máximos e mínimos do ângulo de ataque são  $37,3^\circ$  e  $-27,3^\circ$ , respectivamente.

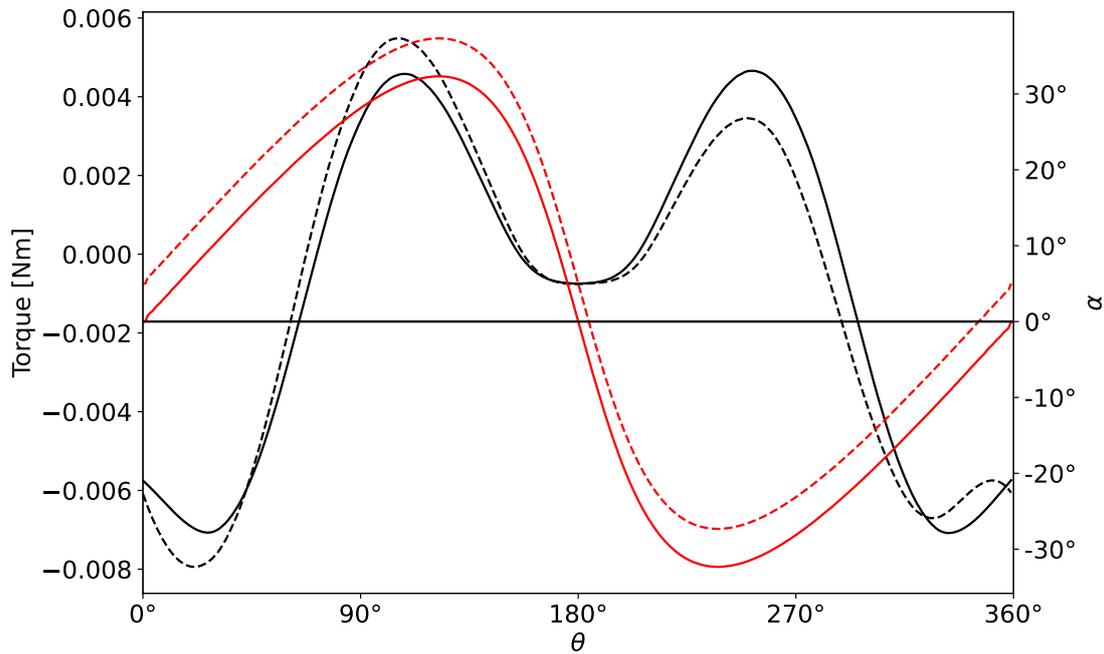


Figura A.3 – Gráficos mostra a relação entre o torque, ângulo de ataque e a posição azimutal da pá para os ângulos de inclinação de  $-5^\circ$  e  $0^\circ$ . (---) torque de uma pá para inclinação de  $-5^\circ$ . (---) ângulo de ataque da pá para inclinação de  $-5^\circ$ . (—) torque de uma pá para inclinação de  $0^\circ$ . (—) ângulo de ataque da pá para inclinação de  $0^\circ$ .

Na posição azimutal de  $105^\circ$ , que corresponde a um ponto de torque máximo antes de  $180^\circ$ , o caso com inclinação de  $0^\circ$  registrou um torque de  $0,0045 \text{ N} \cdot \text{m}$  e um ângulo de ataque de  $30,94^\circ$ , enquanto o caso com inclinação de  $-5^\circ$  teve um torque de  $0,0054 \text{ N} \cdot \text{m}$  e um ângulo de ataque de  $35,91^\circ$ . Já na posição azimutal de  $253^\circ$  o torque para a pá com inclinação de  $0^\circ$  foi de  $0,004 \text{ N} \cdot \text{m}$ , acompanhado de um ângulo de ataque de  $-31,21^\circ$ . No caso com inclinação de  $-5^\circ$ , o torque foi de  $0,0034 \text{ N} \cdot \text{m}$  e o ângulo de ataque foi de  $-26,21^\circ$ . O torque no caso do inclinação de  $0^\circ$  tem o seu ponto máximo na posição azimutal de  $253^\circ$ , enquanto a pá com inclinação de  $-5^\circ$  tem o seu ponto máximo na posição  $105^\circ$ . Outro ponto importante é a redução no valor de ponto máximo de pois da posição de  $180^\circ$  para o caso com inclinação de  $-5^\circ$ , quando comparado com inclinação de  $0^\circ$ .