

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DA ESTEIRA AERODINÂMICA DE UMA TURBINA EÓLICA OFFSHORE:  
ABORDAGEM COM MODELO DE DISCO ATUADOR E USO DO OPENFOAM

por

Bruno Barcellos Hervé

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, setembro de 2023

### CIP - Catalogação na Publicação

Hervé, Bruno Barcellos  
ANÁLISE DA ESTEIRA AERODINÂMICA DE UMA TURBINA  
EÓLICA OFFSHORE: ABORDAGEM COM MODELO DE DISCO ATUADOR  
E USO DO OPENFOAM / Bruno Barcellos Hervé. -- 2023.  
25 f.  
Orientador: Adriane Prisco Petry.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Energia Eólica. 2. Disco Atuador. 3. OpenFOAM.  
4. Camada Limite Atmosférica. 5. RANS. I. Petry,  
Adriane Prisco, orient. II. Título.

Bruno Barcellos Hervé

ANÁLISE DA ESTEIRA AERODINÂMICA DE UMA TURBINA EÓLICA OFFSHORE:  
ABORDAGEM COM MODELO DE DISCO ATUADOR E USO DO OPENFOAM

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Ignácio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Adriane Prisco Petry (Presidente)

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Letícia Jenisch Rodrigues

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Porto Alegre, setembro de 2023

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais que sempre me incentivaram e são exemplo de vida, além de terem me proporcionado a oportunidade de estudar em boas escolas. Juntamente com eles, aos meus irmãos que se criaram comigo e dividiram diversas experiências de vida, sendo exemplos cada um à sua maneira.

À professora Dr<sup>a</sup>. Adriane Prisco Petry, minha orientadora, que possibilitou a realização do trabalho. Pela sua disponibilidade e apoio, além do ensino, tanto durante a orientação quanto nas disciplinas do curso.

Aos meus colegas e professores da UFRGS, que de alguma forma me ajudaram e incentivaram ao longo do curso, e ao engenheiro Gabriel Dumont que ajudou na criação do modelo de simulação.

À UFRGS por me proporcionar a oportunidade de realizar um curso de graduação de excelência, reconhecido nacional e internacionalmente.

E, principalmente, à minha esposa Michele Elisa Weschenfelder Hervé, que é a minha companheira de vida e que compartilhou comigo toda essa experiência, me apoiando ao longo do trajeto e possibilitando essa realização. Por sua presença em minha vida e pelos maiores presentes que temos nas nossas, nossas duas filhas. A elas por me ensinarem todos os dias e me incentivarem a ser uma pessoa melhor sempre.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2023

ANÁLISE DA ESTEIRA AERODINÂMICA DE UMA TURBINA EÓLICA  
OFFSHORE: ABORDAGEM COM MODELO DE DISCO ATUADOR E USO  
DO OPENFOAM

**Hervé, Bruno Barcellos**

bbherve@gmail.com

**Resumo.** O presente trabalho busca analisar a esteira aerodinâmica formada por uma turbina eólica offshore. São analisadas as esteiras geradas em CFD utilizando dois modelos de turbulência para resolução do problema: o modelo  $k-\varepsilon$  e o modelo de tensões de Reynolds. O software utilizado foi o OpenFOAM e foi considerada a turbina como um disco atuador. Os referenciais de velocidade de vento foram baseados em dados da plataforma FINO3 com a camada limite atmosférica em condição neutra. O resultado apresenta uma diferença considerável entre os modelos, sendo observadas variações de velocidade superiores à 11% na região mais próxima da turbina e de cerca de 2% no final do domínio gerado. Nessa região também é observada a persistência de uma redução, em torno de 10%, da velocidade inicial para ambos os modelos. Com isso, conclui-se que, para as condições consideradas, é esperada uma esteira de grande comprimento e que no modelo de tensões de Reynolds ela apresenta maior impacto que no modelo  $k-\varepsilon$ , apresentando maiores reduções no campo de velocidades, principalmente na região proximal e média da esteira aerodinâmica.

**Palavras-chave:** Energia Eólica, Disco Atuador, OpenFOAM, Camada Limite Atmosférica, RANS

**Wake Analysis of an offshore Wind Turbine: Use of OpenFOAM and Actuator Disk Model Abstract.** The presente work seeks to analyse the wake of an offshore wind turbine. CFD generated wakes are analysed using two turbulence models, the  $k-\varepsilon$  turbulence model and Reynolds stress model. The software used was OpenFOAM and the turbine was considered as an actuator disk. Wind velocity reference values were based in data from FINO3 platform with neutral condition of the atmospheric boundary layer. The results show a considerable difference between the models, with velocity variations of more than 11% in the region nearest to the turbine and of about 2% at the end of the generated mesh. It is also observed in this region a persistent reduction of about 10% the initial velocity for both models. Thus, it is concluded that for the considered conditions a long wake is expected, and it has more impact in the Reynolds stress model, presenting bigger reductions in the velocity field, specially in the near and mid wake regions.

**Keywords:** Wind Energy, Actuator Disk, OpenFOAM, Atmospheric Boundary Layer, RANS

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disco Atuador .....	4
Figura 2 - Domínio computacional com malha mais refinada .....	8
Figura 3 - Vista superior da malha, na altura do centro do disco atuador .....	8
Figura 4 - Variações de velocidade devido a malha no modelo $k-\varepsilon$ .....	9
Figura 5 - Campo de velocidades na região da esteira aerodinâmica para o caso $k-\varepsilon$ , vista do plano na altura média do disco atuador .....	10
Figura 6 - Campo de velocidades na região da esteira aerodinâmica para o caso RSM, vista do plano na altura média do disco atuador .....	10
Figura 7 - Valores de $k$ para os modelos $k-\varepsilon$ e RSM .....	11
Figura 8 - Campo de energia cinética turbulenta para o modelo $k-\varepsilon$ , vista do plano na altura média do disco atuador .....	12
Figura 9 - Campo de energia cinética turbulenta para o modelo RSM, vista do plano na altura média do disco atuador .....	12
Figura 10 - Variação de velocidade dos modelos $k-\varepsilon$ e RSM.....	12

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CLA	Camada limite atmosférica
FINO3	<i>Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee 3</i>
L	Leste
LRR	Launder, Reece e Rodi
N	Norte
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
ONU	Organização das nações unidas
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RSM	<i>Reynolds Stress Model</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
GCI	<i>Grid Convergence Index</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Fator de indução axial
$A$	Área de varredura das pás da turbina
$c_p$	Calor específico do ar seco
$C_p$	Coefficiente de potência
$C_{\varepsilon 1}$	Constante do modelo $k-\varepsilon$
$C_{\varepsilon 2}$	Constante do modelo $k-\varepsilon$
$C_\mu$	Constante do modelo $k-\varepsilon$
$D$	Diâmetro de varredura das pás da turbina
$k$	Energia cinética turbulenta
$p$	Pressão
$p_o$	Pressão de referência
$P$	Potência
$P_k$	Taxa de produção de energia cinética turbulenta
$R$	Constante dos gases ideais para o ar
$T$	Temperatura do ar
$u$	Velocidade
$u'$	Flutuação de velocidade
$U$	Velocidade média
$U_d$	Velocidade do vento no disco
$U_w$	Velocidade do vento a jusante do disco
$U_\infty$	Velocidade do vento a montante do disco



## Letras gregas

$\varepsilon$	Taxa de dissipação turbulenta
$\theta$	Temperatura potencial
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\mu_T$	Viscosidade turbulenta
$\rho$	Massa específica
$\sigma_\varepsilon$	Número de Prandtl de $\varepsilon$
$\sigma_k$	Número de Prandtl de $k$

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	1
2.1 Camada Limite Atmosférica.....	2
2.2 Equações Governantes.....	3
2.3 Disco Atuador.....	4
2.4 Esteira Aerodinâmica.....	5
2.5 Turbulência.....	6
3. METODOLOGIA E MODELAGEM.....	7
4. RESULTADOS .....	9
5. CONCLUSÕES.....	13
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	13
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14

## 1. INTRODUÇÃO

A busca por energia limpa e acessível é um importante fator na sociedade atual, sendo um dos objetivos de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU). O uso de fontes renováveis para alcançar esse objetivo, permite a decarbonização da atual matriz energética e consequente redução das emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa. Uma das metas para 2025 no plano de ação das nações unidas é duplicar a capacidade energética global associada às fontes renováveis (UN-Energy, 2022).

Dentre as renováveis, a energia eólica deve dominar o crescimento do setor, juntamente com a energia solar (IRENA, 2022). Na matriz brasileira a energia eólica já tem um importante papel, possuindo em 2021 uma capacidade instalada acima de 21 GW (ABEEOLICA, 2022) e tendo sido um dos cinco maiores mercados mundiais de novas instalações em 2022 (GWEC, 2023). Entretanto, essa capacidade é gerada na sua totalidade de modo *onshore*, sendo aguardada ainda a liberação e instalação dos primeiros projetos *offshore*. A possibilidade de exploração do potencial *offshore* pode contribuir ainda mais na diversificação da matriz elétrica, sendo mapeado um potencial aproximado de 700 GW segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020).

Todavia, os parques eólicos *offshore* podem ter perdas acima de 10% devido a esteira aerodinâmica gerada pelas turbinas (BARTHELMIE et al., 2006; BARTHELMIE et al., 2009). Por esse motivo se torna importante o estudo dessa ocorrência, que acaba influenciando na produtividade do parque e, por consequência, na viabilidade do mesmo.

Um dos fatores que influencia a esteira aerodinâmica é a camada limite atmosférica (CLA). A condição da CLA que pode ser caracterizada como neutra, estável ou instável, pode fazer com que a esteira atinja um comprimento maior ou menor (CAÑADILLAS et al., 2020), afetando diretamente a produção do parque eólico.

Uma alternativa para o estudo desses recursos é a realização de simulações computacionais. As simulações com uso de CFD (*computational fluid dynamics*) permitem a análise das variáveis associadas à implementação de um parque eólico, possibilitando uma redução nas incertezas de projeto e demonstrando se este pode ser atrativo ou não do ponto de vista de mercado. Entretanto, para que isso seja viável é necessário a definição de um modelo de estudo adequado, já que existem diversos modelos de turbulência para resolução e cada um destes pode se aproximar mais ou menos da situação real, dependendo do objeto de estudo.

O presente trabalho busca analisar a esteira aerodinâmica de turbinas *offshore*, comparando dois modelos de turbulência, levando em consideração o modelo de disco atuador e considerando a CLA neutra. Para tal, são realizadas simulações em CFD com o pacote OpenFOAM, utilizando como referência a região do mar do norte. Os modelos considerados para realizar a análise são o modelo de duas equações  $k-\epsilon$  e o modelo de tensões de Reynolds.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Essa seção aborda conceitos básicos que fundamentam o trabalho desenvolvido. Como é realizada a simulação computacional da esteira aerodinâmica de turbinas *offshore*, é necessário fundamentar esses fenômenos, elucidar as escolhas realizadas para resolução do

problema e contextualizar a importância dessas questões. Dessa forma, é apresentado o conceito de CLA, de disco atuador e da esteira aerodinâmica. Além disso, são contempladas as equações governantes e a turbulência, que serviram de base para esse estudo.

## 2.1 Camada Limite Atmosférica

A camada limite atmosférica descreve o comportamento do vento dentro de uma parte da troposfera, camada mais próxima do solo terrestre, sendo influenciada pela força do vento geostrófico, pela rugosidade da superfície, pelo efeito Coriolis e pelos efeitos térmicos (BURTON et al., 2011). Essa região se estende entre 100 e 3000 metros da superfície, sendo seguida da chamada atmosfera livre, compreendendo, junto com a CLA, cerca de 11 quilômetros e assim a totalidade da troposfera (STULL, 1988).

Os efeitos térmicos são gerados pelas variações de temperatura na superfície. O ar quente ascende devido a uma menor massa específica que o ar na sua vizinhança. Ao ascender, devido à redução de pressão que ocorre proporcionalmente a elevação da altitude, o ar expande e resfria adiabaticamente. Esse resfriamento pode levar a diferentes condições de equilíbrio térmico, gerando, dessa forma, a estratificação da camada limite atmosférica.

A estratificação da CLA pode ser caracterizada como instável, estável ou neutra. A atmosfera instável ocorre quando o resfriamento não é suficiente para levar a corrente de ar ascendente ao equilíbrio térmico com a vizinhança, permanecendo mais quente e, por consequência, mantendo e acentuando essa movimentação. Dessa forma, pode ser percebido um perfil de velocidade que não varia de forma acentuada com a altura.

Na CLA estável, ocorre o inverso. O resfriamento acaba levando o ar a uma condição de temperatura inferior à da vizinhança, reduzindo essa movimentação e podendo levar a uma condição de grande variação da velocidade conforme a altura.

A condição de atmosfera neutra, por sua vez, ocorre quando pode ser observada uma situação de equilíbrio térmico após o resfriamento adiabático. Nessa condição as propriedades são dependentes principalmente da rugosidade da superfície e do efeito Coriolis (BURTON et al., 2011), desconsiderando as forças de empuxo. Por ser uma boa aproximação nos casos de ventos mais fortes, acaba sendo muito utilizada nos estudos de energia eólica.

A definição entre essas categorias pode ser feita através da temperatura potencial  $\theta$  [K], que seria a temperatura ao se desconsiderar os efeitos da variação de pressão dada pela altitude sobre ela, definida pela Equação 1.

$$\theta = T \left( \frac{p_o}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (1)$$

onde  $T$  é a temperatura do ar na altura de interesse [K],  $p$  a pressão nessa mesma altura [Pa] e  $p_o$  a pressão de referência [Pa], usualmente a nível do mar. A constante  $R$  é dos gases ideais para o ar [J/kg.K] e  $c_p$  o calor específico do ar seco [J/kg.K].

Dessa forma, a variação de  $\theta$  com a variação da altitude  $z$  ( $\partial\theta/\partial z$ ) vai indicar a condição de CLA neutra quando  $\partial\theta/\partial z = 0$ , instável quando  $\partial\theta/\partial z > 0$  e estável quando  $\partial\theta/\partial z < 0$ .

Devido a variação de temperatura da superfície do mar ser menos acentuada ao longo do dia do que em terra, esses gradientes de temperatura podem ser significativos em condições *offshore*. Portanto, apesar deste trabalho ter considerado apenas a situação de camada neutra, é importante salientar que os efeitos térmicos na atmosfera tem um grande potencial de interferir na geração eólica *offshore*, devendo estes efeitos serem estudados em trabalhos futuros.

## 2.2 Equações Governantes

Os escoamentos estudados seguem os princípios de conservação de massa (Equação 2) e tem seus campos de velocidade e pressão determinados pela Equação de Navier-Stokes (Equação 3).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_m \quad (3)$$

Sendo  $u$  a velocidade [m/s],  $\rho$  a massa específica [kg/m<sup>3</sup>],  $p$  a pressão [Pa],  $\mu$  a viscosidade dinâmica [N.s/m<sup>2</sup>] e  $S_m$  as forças externas.

Entretanto, como resolver completamente as equações de Navier-Stokes é muito difícil, a não ser para casos muito simples, se faz necessária a utilização de alguns recursos. Uma das alternativas é o uso da equação de Navier-Stokes com médias de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes* – RANS), Equação 4.

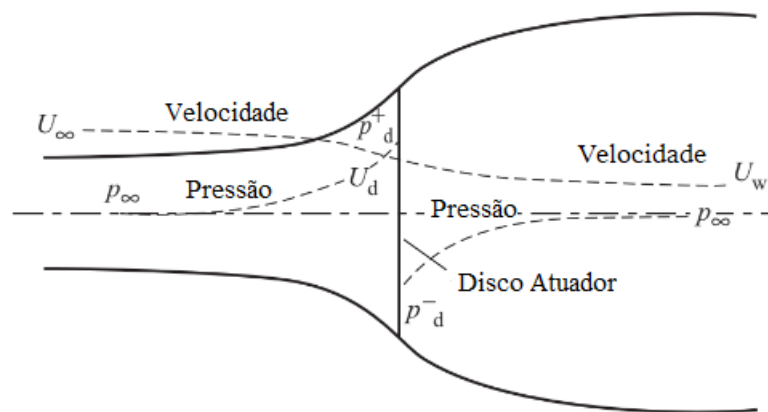
$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad (4)$$

O que é feito na RANS é que se separam as variáveis  $u$  e  $p$  em duas partes cada, uma que representa a média e uma que representa a flutuação da respectiva variável. Dessa forma a equação passa a ser representada por médias, mas é acrescida do termo  $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ , conhecido como tensor de Reynolds (JONES et al., 2016). Esse termo adicional gera o problema do fechamento da turbulência, que traz a necessidade de modelos de turbulência para resolução da equação.

### 2.3 Disco Atuador

O princípio do disco atuador leva em consideração a extração de energia para analisar o comportamento aerodinâmico, sem a necessidade de maiores especificações da turbina (BURTON et al., 2011). Assume-se a presença de um disco de espessura desprezível no lugar da turbina e quando o fluido passa pelo disco ocorre uma queda de pressão e uma redução na velocidade como é representado na Figura 1.

Figura 1 - Disco Atuador



Fonte: adaptado de BURTON et al., 2011

Sendo  $U$  a velocidade do vento,  $p$  a pressão e o subscrito  $\infty$  indica uma região bem anterior ao disco,  $d$  a região do disco e  $w$  uma região bem posterior ao disco.

Como a vazão mássica deve permanecer constante, a redução de velocidade gera o aumento da área após o disco (assumindo fluido incompressível), seguindo a Equação 5.

$$\rho A_\infty U_\infty = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w \quad (5)$$

onde  $\rho$  é a massa específica em  $\text{kg/m}^3$ .

Pode ser considerado então que o disco atuador induz uma variação de velocidade na corrente de ar, originando o termo  $a$  que é o fator de indução axial, que leva a Equação 6.

$$U_d = U_\infty(1 - a) \quad (6)$$

A partir dessas definições e utilizando a equação de Bernoulli, podemos deduzir a Equação 7, que apresenta a potência  $P$  extraída do vento.

$$P = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1 - a)^2 \quad (7)$$

De onde podemos tirar o coeficiente de potência  $C_p$ , representado na Equação 8, e rearranjando a Equação 7 em 9.

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (8)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho U_\infty^3 A_d C_p \quad (9)$$

Esse coeficiente atinge seu valor máximo quando  $a = 1/3$ , chegando ao valor de 0,593, também conhecido como limite de Betz.

## 2.4 Esteira Aerodinâmica

A esteira aerodinâmica é formada após o vento passar pela turbina e ter energia cinética convertida em energia mecânica pela mesma, ficando caracterizada uma região a jusante da turbina com aumento da turbulência e redução da velocidade do vento. Assim como vemos com o disco atuador, a região de esteira tem diâmetro um pouco maior que a turbina. Conforme essa região se afasta da turbina, ocorre a mistura com a região não afetada no entorno e, aos poucos, retorna ao normal (BURTON et al., 2011). Entretanto, esse retorno é influenciado pelas condições de turbulência no local e pode ser mais próximo ou mais distante do ponto em que a esteira foi produzida, o que pode influenciar diretamente no parque eólico.

Ao ser considerado o comportamento da esteira, esta pode ser dividida em duas regiões: uma região mais próxima da turbina, até 2 a 4 diâmetros de varredura das pás de distância (*near wake* - proximal); e uma distante da turbina, acima de 5 diâmetros (*far wake* - distal). A região mais próxima sofre influências da própria dinâmica da turbina, enquanto a região mais distante acaba sendo mais influenciada por condições ambientais como a estabilidade da atmosfera (ARAYA, 2021).

Devido à redução de velocidade que ocorre, a esteira pode ser responsável pela maior perda de potência do parque, além de possivelmente contribuir para o aumento da fadiga dos componentes das turbinas. Por isso, a simulação dessas acabam sendo de extrema importância na definição do layout dos parques eólicos (TRABUCCHI; VOLLMER; KÜHN, 2017).

## 2.5 Turbulência

A turbulência é caracterizada em escoamentos por um comportamento irregular, evidenciado por flutuações na velocidade do fluido em uma escala de tempo muito pequena, normalmente inferiores à 10 minutos. Essas flutuações são produzidas, principalmente, pelo atrito com a superfície e pelos efeitos térmicos (BURTON et al., 2011).

A representação dessas flutuações no método RANS, como foi visto anteriormente, é através do tensor de Reynolds, que acaba levando ao problema do fechamento.

Um dos modelos de turbulência mais utilizados para resolução desse problema, devido sua robustez e economia, é o modelo  $k - \varepsilon$  (CABEZÓN; MIGOYA; CRESPO, 2011). Esse modelo utiliza duas equações de transporte adicionais, uma para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e outra para a taxa de dissipação turbulenta ( $\varepsilon$ ). As mesmas são representadas como Equação 10 e 11, respectivamente.

$$\rho \frac{\partial(U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\rho \frac{\partial(U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon}{k} P_k - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

Nessas surge o termo de viscosidade  $\mu_T$  para viscosidade turbulenta, que é representado pela Equação 12. O termo  $P_k$  faz referência a uma taxa de produção de energia cinética turbulenta, que pode ser visualizado na Equação 13 para escoamentos incompressíveis.

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

$$P_k = \frac{\mu_T}{\rho} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (13)$$

As demais variáveis  $C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$  e  $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  são constantes empíricas e, portanto, conseguimos resolver o problema do fechamento.

Outra forma de resolver o problema, seria utilizar o modelo de tensões de Reynolds (*Reynolds Stress Model* – RSM), que resolve as equações de transporte para as tensões de Reynolds individuais e para a taxa de dissipação da turbulência (POPE, 2000). Nesse modelo



as seis variáveis do tensor de Reynolds são resolvidas, empregando também constantes empíricas, removendo a necessidade do termo de viscosidade turbulenta.

### 3. METODOLOGIA E MODELAGEM

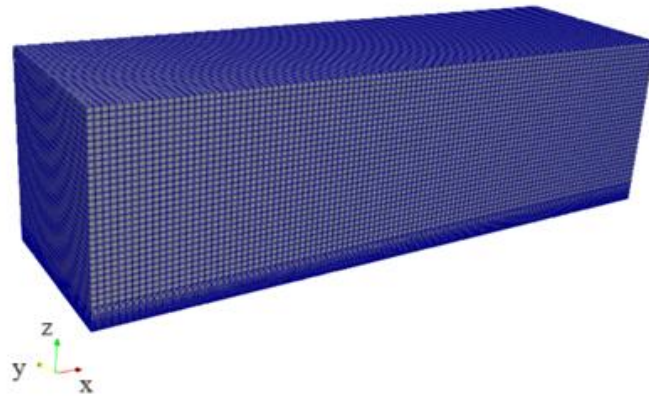
Nesse trabalho foi utilizado o software de CFD OpenFOAM, que é um pacote de simulação numérica de escoamentos, *open source*, baseado em ferramentas em C++, que possui uma série de *solvers* numéricos, podendo ser ajustadas diversas variáveis a partir de um caso base oriundo dos tutoriais. O tutorial utilizado foi o *turbineSiting*, que tem o *simpleFoam* como solver e funciona com o algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*), sendo indicado para casos de regime permanente.

O SIMPLE é um dos métodos mais populares para solução numérica de escoamentos incompressíveis estacionários, mas que pode também ser modificado para obter soluções para casos transientes (FORTUNA, 2020). O algoritmo parte de uma estimativa para o campo de pressões, que possibilita a obtenção de aproximações para as velocidades. Com essas é obtida a correção para a pressão que, posteriormente, é utilizada para chegar nos novos valores de velocidades. A partir daí são realizadas iterações até o resultado convergir.

Foi definida como turbina de referência para o estudo a turbina NREL 5MW 126 RWT, que é um modelo referencial de turbina eólica *offshore* do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) e cujos dados se encontram disponíveis para download. Da mesma forma, os dados da região escolhida também se encontram disponíveis online, sendo utilizada a região da FINO3, no mar do norte, como local de estudo. A FINO3 (*Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee 3*) é uma de três plataformas de pesquisa no mar do norte e báltico, que fazem monitorização meteorológica e de condições do mar. A plataforma, que fica localizada nas coordenadas 55° 11,7' N, 007° 9,5' L, realiza a medição da velocidade e direção do vento em diferentes alturas, dentre seus diversos dados. No trabalho foram utilizados os dados de um dia e horário no qual a CLA estava caracterizada como neutra e a velocidade média na altura de 91 metros era, aproximadamente, 10,5 m/s.

Com a definição da região e da turbina, foi produzida uma geometria de aproximadamente 27 diâmetros (da turbina) de comprimento (3,4 km), e 8 diâmetros de largura e altura (1,0 km), sendo arredondado para os valores citados. Essas dimensões se aproximam das utilizadas no estudo de AbdalSalam et al. (2017), tendo sido reduzida a distância anterior ao disco atuador, por ser considerada de pouco impacto ao estudo, e definida a mesma distância de altura e largura do domínio. A confecção da geometria foi realizada no próprio OpenFOAM, através do arquivo *blockMeshDict*, onde também foi determinada uma malha inicial. Essa malha foi trabalhada posteriormente através do *snappyHexMesh*, no qual podem ser definidas regiões de interesse para maior refino. O domínio produzido, com a malha mais refinada, pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Domínio computacional com malha mais refinada

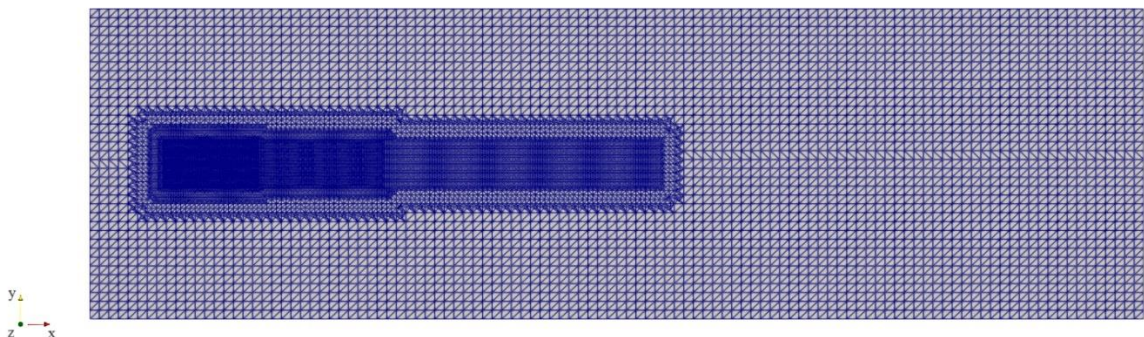


Fonte: Autor

O disco atuador foi posicionado a uma distância aproximada de 2 diâmetros da origem em  $x$ , centralizado no eixo  $y$  e a uma altura de 90 m em  $z$ , seguindo as informações de altura do rotor da turbina. Dessa forma é possível acompanhar o completo desenvolvimento da esteira, sem perder dados pela limitação de tamanho do domínio. A definição do disco atuador no OpenFOAM passa pelos arquivos *fvOptions* e *topoSetDict*, e por ser uma região de interesse, tem a malha mais refinada ajustada pelo *snappyHexMesh*.

Nesse estudo foram definidas como regiões de interesse o disco e a esteira, sendo a esteira dividida em três regiões, como no trabalho de Cabezón et al. (2011). Foi incluída uma região média para facilitar a transição entre a proximal e a distal, permitindo também uma mudança mais suave entre o refino dessas regiões. O refino da malha nessas partes foi maior, conforme pode ser visualizado na Figura 3, permitindo uma resolução mais adequada ao problema.

Figura 3 - Vista superior da malha, na altura do centro do disco atuador



Fonte: Autor

Além disso, foram criadas 3 malhas para o trabalho, sendo uma malha menos refinada, com 318.346 volumes, uma intermediária, com 1.952.886 volumes, e uma mais refinada, com 3.894.928 volumes. O resultado entre as malhas foi comparado para se determinar a influência das mesmas e qual era a mais adequada para o caso.

Foi realizado a análise da esteira utilizando dois modelos de fechando para a turbulência, o modelo  $k-\varepsilon$  e o modelo de tensões de Reynolds. Após definição da malha mais adequada, foi realizada a comparação entre os resultados obtidos em cada modelo.

O modelo  $k-\varepsilon$  teve as constantes ajustadas de acordo com o trabalho de Dumont (2019) para modelo de escoamento atmosférico, por se adequar mais ao caso estudado que as constantes padrão utilizadas no OpenFOAM, baseadas no estudo de Launder e Spalding (1974).

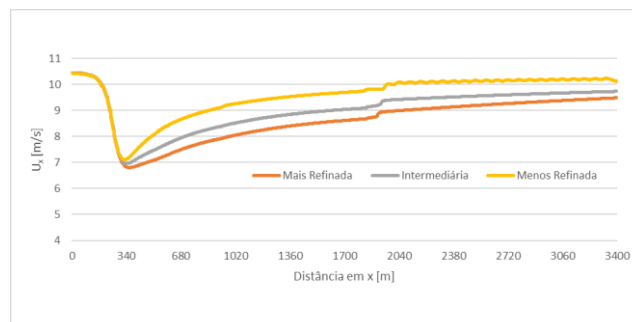
O modelo de tensões de Reynolds, por sua vez, foi realizado com o modelo de Launder, Reece e Rodi (1975), identificado como LRR no OpenFOAM, mas devido ao custo computacional envolvido para resolução do modelo, se utilizou o resultado do modelo  $k-\varepsilon$  como dados iniciais. Foi utilizado para isso o recurso *mapFields*, que permite mapear os dados de uma geometria e os transpor para outra. Dessa forma, foi definido o final da simulação do modelo  $k-\varepsilon$  como início da simulação do RSM, e, por serem geometrias idênticas, foi aplicado o recurso *-consistent*.

#### 4. RESULTADOS

Os resultados foram analisados através do uso do software Paraview, que é um programa de computador *open source* para visualização de dados. Foi realizada uma comparação do resultado das malhas para o modelo  $k-\varepsilon$  e, dessa forma, definir a influência do refino no resultado. Inicialmente seria realizado um estudo da malha com GCI (*Grid Convergence Index*) e, para isso, mais um refinamento da malha seguindo a mesma taxa de crescimento entre a média e a refinada (aproximadamente 1,99), produzindo uma malha com mais de 7 milhões de volumes. Contudo, o tempo de processamento já ultrapassava 10 horas e o pós processamento com o recurso computacional disponível poderia apresentar problemas, permanecendo em estudo apenas as malhas previamente citadas, gerando essa limitação.

Os resultados obtidos no modelo  $k-\varepsilon$  para a malha menos refinada apresentaram variação na média de velocidades em mais de 6% para a malha intermediária, o que reduziu para 4% entre esta e a mais refinada. Isso pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Variações de velocidade devido a malha no modelo  $k-\varepsilon$



Fonte: Autor

Entretanto, como uma estimativa de 4% a mais na velocidade pode levar a uma superestimação de potência disponível em 12,5% (O’SULLIVAN; ARCHER; FLAY, 2011), verificado facilmente através da equação para potência disponível, foi considerada a malha mais refinada como a mais adequada para o estudo.

Também pode ser evidenciado nesse modelo uma variação maior de velocidade próximo do disco atuador, na região de esteira proximal. Nesse local a variação chegou próximo dos 10%, considerando as malhas menos refinadas.

Na comparação entre os modelos também ficaram evidentes as diferenças nas esteiras geradas por ambos. As Figuras 5 e 6 ilustram o caso utilizando os modelos  $k-\varepsilon$  e RSM, respectivamente.

Figura 5 - Campo de velocidades na região da esteira aerodinâmica para o caso  $k-\varepsilon$ , vista do plano na altura média do disco atuador



Fonte: Autor

Figura 6 - Campo de velocidades na região da esteira aerodinâmica para o caso RSM, vista do plano na altura média do disco atuador



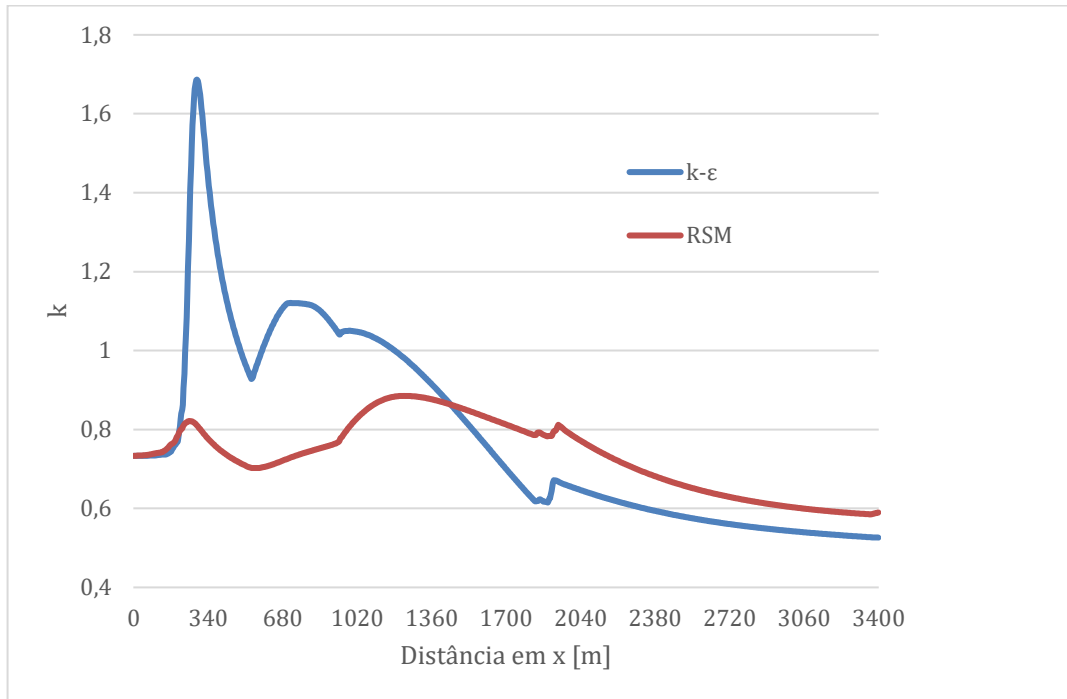
Fonte: Autor

Ambas as imagens demonstram o comportamento da esteira através de uma vista superior e na altura do centro do disco atuador. A esteira na resolução com RSM fica muito mais clara, caracterizando uma maior área de esteira e que parece se prolongar em uma maior distância.

Esse fato pode ser devido a superestimação de  $k$  que ocorre no modelo  $k-\varepsilon$  (QURESHI; CHAN, 2020; TSUCHIYA et al., 1997), dessa forma, ocorre um possível aumento na mistura

do ar e conseqüente suavização precoce da esteira aerodinâmica. A diferença entre os casos pode ser vista na Figura 7, demonstrando essa possibilidade.

Figura 7 - Valores de  $k$  para os modelos  $k-\epsilon$  e RSM



Fonte: Autor

Fica visível nas regiões proximal e média da esteira um pico nos valores de energia cinética turbulenta para o modelo  $k-\epsilon$ , permanecendo bem acima dos valores obtidos no modelo RSM, onde as variações são mais suaves. Apenas quando passam a região de esteira distal que as curvas parecem se comportar de maneira similar.

Esses valores de  $k$  foram obtidos considerando uma linha que passa no centro do disco atuador, percorrendo todo comprimento do domínio nessa altura. O comportamento observado em todo o plano que passa nessa altura, por sua vez, pode ser visto nas Figuras 8 e 9, demonstrando que esse perfil, com valores mais elevados para o modelo  $k-\epsilon$ , permanece em outras regiões. Outro ponto a ser visualizado nessas imagens é o fato de termos maiores valores de energia cinética turbulenta nas regiões que ficam a jusante da parte do disco onde seria a ponta de pá (se fossemos considerar a turbina), caracterizado pelo cisalhamento nesse local.

Figura 8 - Campo de energia cinética turbulenta para o modelo  $k-\epsilon$ , vista do plano na altura média do disco atuador



Fonte: Autor

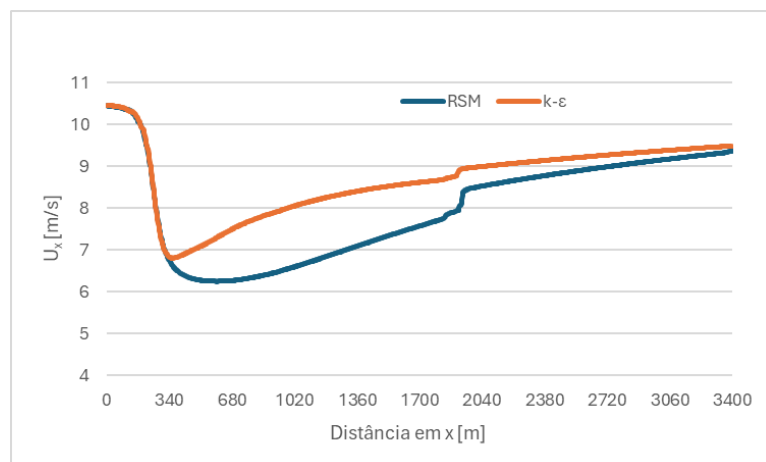
Figura 9 - Campo de energia cinética turbulenta para o modelo RSM, vista do plano na altura média do disco atuador



Fonte: Autor

No caso estudado foi observada, ainda, uma variação na velocidade, na região de esteira distal, de pouco mais de 2% entre os modelos. Entretanto, nas regiões proximal e intermediária chegou a mais de 11% essa diferença, corroborando com a ideia apresentada. Essa variação pode ser vista na Figura 10.

Figura 10 - Variação de velocidade dos modelos  $k-\epsilon$  e RSM



Fonte: Autor



No gráfico também pode ser observada uma variação mais abrupta que coincide com a região mais próxima do final da esteira distal, possivelmente devido a variação da malha nesse local. Como já era esperada uma suavização da esteira na região de  $20D$  (POLITIS et al., 2012), não era esperado que se tivesse esse impacto na análise. Entretanto, foi observada uma redução de velocidade persistente, próxima de 10% para ambos os modelos de turbulência, até o final do domínio. Portanto, fica indicada uma necessidade de maior refino da malha, ou, pelo menos, de um aumento da extensão da região de interesse, possibilitando uma melhor verificação do comportamento da esteira em todo seu comprimento.

Dessa forma, pode ser observado o grande impacto que a esteira pode ter no potencial de geração de energia de um parque eólico, já que são observadas reduções consideráveis de velocidade mesmo à uma grande distância da turbina. Esse distanciamento deve ser observado na determinação dos locais onde ficarão as turbinas e, se considerado de forma equivocada por um modelo inadequado, pode superestimar a produção de energia.

## 5. CONCLUSÕES

Foram realizadas simulações computacionais no OpenFOAM, utilizando o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  e o modelo de tensões de Reynolds, sendo observada a esteira aerodinâmica produzida ao se considerar o modelo de disco atuador.

Com isso, pode ser percebido que a esteira aerodinâmica tem um efeito considerável no campo de velocidades. Esse efeito ficou mais evidente ao utilizar o modelo de tensões de Reynolds em comparação ao modelo de duas equações  $k-\varepsilon$ , possivelmente devido a superestimação de  $k$  nesse segundo modelo. Dessa forma, fica claro o cuidado necessário ao escolher o modelo adequado a cada caso, pois o impacto no resultado pode ser considerável.

Ambos os casos apresentaram reduções de velocidades que não retornaram aos valores iniciais nem depois de aproximadamente  $25D$ , indicando que o comprimento da esteira pode ser maior que o esperado. Entretanto, é difícil afirmar se esse valor não foi comprometido pela alteração de refino na malha, devendo ser melhor estudado após uma correção nesse ponto.

Visto o que foi apresentado, conclui-se que o modelo RSM apresenta um bom potencial de uso nos casos *offshore* com CLA neutra, apresentando um resultado que possivelmente minimiza a subestimação da esteira aerodinâmica produzida e, por consequência, não superestima o potencial produtivo de um parque eólico a ser instalado em tais condições.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Devem ser realizados mais estudos para comparar esses modelos com outros também utilizados para condições similares e para validar os dados em situações reais. Além disso, é de grande importância a aplicação desses modelos em estudos que também considerem a CLA estável e instável, devido aos potenciais efeitos dessas condições, permanecendo a intenção de um futuro trabalho que implemente essas considerações.

Fica a sugestão da realização de trabalhos com domínios de maiores dimensões, além do uso de malhas mais refinadas, permitindo a observação da real dimensão da esteira aerodinâmica e a total extensão de seus efeitos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELSALAM, A. M.; ABUHEGAZY, M. R.; SAKR, I. M.; EL-ASKARY, W. A. The Impact of Different Inflow Conditions on the Wake of Horizontal Axis Wind Turbine. **17th International Conference on AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY**, Cairo, Egypt, 2017.

ABEEOLICA. Boletim Anual 2021. **Associação Brasileira de Energia Eólica**, 2022. Disponível em: [https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/07/ABEEOLICA\\_BOLETIMANUAL-2021\\_PORT.pdf](https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/07/ABEEOLICA_BOLETIMANUAL-2021_PORT.pdf). Acessado em 21/06/2023.

ARAYA, D. M. **OFFSHORE WIND FARM CFD MODELLING: UNCERTAINTY QUANTIFICATION AND POLYNOMIAL CHAOS**. Thesis - Faculty of Science and Engineering, University of Manchester, 2021.

BARTHELMIE, R. J.; LARSEN, G. C.; FRANDBSEN, S. T.; FOLKERTS, L.; RADOS, K.; PRYOR, S. C.; LANGE, B.; SCHEPERS, G. Comparison of Wake Model Simulations with Offshore Wind Turbine Wake Profiles Measured by Sodar, **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, vol. 23(7), pp. 888-901, 2006. doi: <https://doi.org/10.1175/JTECH1886.1>

BARTHELMIE, R. J.; HANSEN, K.; FRANDBSEN, S. T. et al. Modelling and measuring flow and wind turbine wakes in large wind farms offshore. **Wind Energy**, vol. 12, pp. 431-444, 2009. doi: <https://doi.org/10.1002/we.348>

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E., **Wind Energy Handbook**. John Wiley & Sons, Ltd., 2011.

CABEZÓN, D.; MIGOYA, E.; CRESPO, A. Comparison of turbulence models for the computational fluid dynamics simulation of wind turbine wakes in the atmospheric boundary layer. **Wind Energy**, vol. 14, pp. 909-921, 2011. doi: <https://doi.org/10.1002/we.516>

CAÑADILLAS, B.; FOREMAN, R.; BARTH, V. et al. Offshore wind farm wake recovery: Airborne measurements and its representation in engineering models. **Wind Energy**, vol. 23, pp. 1249–1265, 2020. doi: <https://doi.org/10.1002/we.2484>

DUMONT, G. B. **Análise do Potencial Eólico de um Terreno Complexo Empregando Modelagem Numérica da Camada Limite Atmosférica via OpenFOAM**. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

EPE. Roadmap Eólica Offshore Brasil: Perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima. **Empresa de Pesquisa Energética**, Abril de 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->



abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-456/Roadmap\_Eolica\_Offshore\_EPE\_versao\_R2.pdf. Acessado em 20/06/2023.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. Editora da Universidade de São Paulo, 2 ed., São Paulo, 2020.

GWEC. Global Wind Report 2023, **Global Wind Energy Council**, 2023. Disponível em: <https://gwec.net/globalwindreport2023/>. Acessado em 27/06/2023.

IRENA. World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway, **International Renewable Energy Agency**, Abu Dhabi, 2022. Disponível em: <http://www.irena.org/publications>. Acessado em 19/06/2023.

JONES, D. A.; CHAPUIS, M.; LIEFVENDAHL, M.; NORRISON, D.; WIDJAJA, R. **RANS Simulations using OpenFOAM Software**. Maritime Platforms Division, Defence Science and Technology Group, Australia, 2016.

O'SULLIVAN, J. P.; ARCHER, R. A.; FLAY, R. G. J. Consistent boundary conditions for flows within the atmospheric boundary layer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 99, pp. 65-77, 2011. doi: 10.1016/j.jweia.2010.10.009

POLITIS, E. S.; PROSPATHOPOULOS, J.; CABEZON, D.; HANSEN, K. S.; CHAVIAROPOULOS, P. K.; BARTHELMIE, R. J. Modeling wake effects in large wind farms in complex terrain: the problem, the methods and the issues. **Wind Energy**, vol. 15, pp. 161-182, 2012. doi: <https://doi.org/10.1002/we.481>

POPE, S. B. **Turbulent Flows**. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

QURESHI, M. Z. I.; CHAN, A. L. S. Influence of eddy viscosity parameterisation on the characteristics of turbulence and wind flow: Assessment of steady RANS turbulence model. **Journal of Building Engineering**, vol. 27, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100934>.

LAUNDER, B. E.; REECE, G. J.; RODI, W. Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. **Journal of Fluid Mechanics**, vol. 68, pp. 537-566, 1975.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, vol. 3, pp. 269-289, 1974.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Kluwer Academic Publishers, 1988.

TRABUCCHI, D.; VOLLMER, L.; KÜHN, M. 3D Shear layer simulation model for the mutual interaction of wind turbine wakes: Description and first assessment. **Wind Energy Science**, vol. 2, pp. 569–586, 2017. doi: <https://doi.org/10.5194/wes-2-569-2017>

TSUCHIYA, M.; MURAKAMI, S.; MOCHIDA, A.; KONDO, K.; ISHIDA, Y. Development of a new  $k-\varepsilon$  model for flow and pressure fields around bluff body. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 67–68, pp. 169-182, 1997. doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(97\)00071-8](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00071-8).

UN-Energy. **UN - ENERGY PLAN OF ACTION TOWARDS 2025**, Maio de 2022. Disponível em: <https://un-energy.org/wp-content/uploads/2022/05/UN-Energy-Plan-of-Action-towards-2025-2May2022.pdf>. Acessado em 19/06/2023.