

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE  
COMPUTAÇÃO

GUSTAVO BITTAR GONÇALVES

**SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM COLINAS  
PERIÓDICAS UTILIZANDO O OPENFOAM®**

GOIÂNIA  
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o autor e o orientador firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

### 1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Gustavo Bittar Gonçalves

Título do trabalho: Simulação de escoamentos turbulentos em colinas periódicas utilizando o OpenFOAM®

### 2. Informações de acesso ao documento

Concorda com a liberação total do documento  SIM  NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(a)(s) autor(a)(es)(as) e ao(a) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

#### Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

**Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Pamplona Mariano, Professor do Magistério Superior**, em 17/07/2024, às 12:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Bittar Goncalves, Discente**, em 17/07/2024, às 12:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4677808** e o código CRC **BE0D75AC**.

GUSTAVO BITTAR GONÇALVES

**SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM COLINAS  
PERIÓDICAS UTILIZANDO O OPENFOAM®**

Projeto Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Goiás - Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação.

Orientador: Felipe Pamplona Mariano

GOIÂNIA  
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Gonçalves, Gustavo Bittar  
SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM COLINAS PERIÓDICAS UTILIZANDO O OPENFOAM® [manuscrito] / Gustavo Bittar Gonçalves. - 2024.  
lxxxii, 82 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Pamplona Mariano.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, , Engenharia Mecânica, Goiânia, 2024.  
Bibliografia. Apêndice.  
Inclui siglas, mapas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Dinâmica dos Fluidos Computacional. 2. OpenFOAM. 3. Energia Eólica. 4. escoamentos Turbulentos. 5. Colinas Periódicas. I. Mariano, Felipe Pamplona, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dezessete dias do mês de julho do ano de 2024 iniciou-se a sessão pública de defesa do Projeto Final de Curso (PFC) intitulado “Simulação de escoamentos turbulentos em colinas periódicas utilizando o OpenFOAM®”, de autoria de Gustavo Bittar Gonçalves, do curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Professor Dr. Felipe Pamplona Mariano (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Dr. Gino Bertolucci Colherinhas (EMC/UFG) e Professora Dra. Andreia Aoyagui Nascimento (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do(a) estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 9,0 (nove), tendo sido o PFC considerado aprovado, mediante entrega das correções solicitadas pelos membros da Banca Examinadora.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Pamplona Mariano, Professor do Magistério Superior**, em 17/07/2024, às 12:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Aoyagui Nascimento, Professora do Magistério Superior**, em 17/07/2024, às 15:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gino Bertolucci Colherinhas, Professor do Magistério Superior**, em 17/07/2024, às 15:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4677723** e o código CRC **1A2448D8**.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional.  
Ao professor Daniel Cunha, pelo auxílio no meu processo de graduação.  
Ao meu orientador, Felipe Mariano, que me deu todo o suporte para realização deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço profundamente a todos aqueles que tiveram uma participação direta ou indireta na minha graduação, em destaque meu muito obrigado:

Aos meus pais, Maria Assima Bittar Gonçalves e Reinaldo Gonçalves Nogueira, que me deram todo o suporte que eu poderia precisar não apenas na jornada estudantil mas ao longo da minha vida;

Ao meu irmão, Rafael Bittar Gonçalves, que sempre foi um grande ouvinte e apoiador das minhas decisões;

Às minhas avós, Anna e Marilda, pelo carinho que somente avós podem proporcionar;

Ao professor Daniel Cunha, que enquanto coordenador me auxiliou da melhor forma possível ao longo dos processos burocráticos e trâmites da UFG, com muita prestatividade e bons conselhos;

Ao meu orientador Felipe Pamplona Mariano, que contribuiu fortemente para o meu entendimento de CFD e para realização do presente trabalho;

Aos meus colegas com os quais enfrentei os desafios associados à jornada de se tornar engenheiro;

Aos professores, técnicos e demais funcionários da UFG, cujo trabalho foi imprescindível para este momento;

*"A ciência é sobre saber; a engenharia é sobre fazer."  
(PETROSKI, Henry, 1996)*

## RESUMO

GONÇALVES, Gustavo Bittar. **Simulação de Escoamentos Turbulentos em Colinas Periódicas Utilizando o OpenFOAM®**. 2024. 64 f. Projeto Final de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2024.

O presente trabalho visa estabelecer um ponto de partida para determinar o posicionamento ideal de turbinas eólicas em um terreno caracterizado por uma sequência de colinas periódicas. Os fatores determinantes para a escolha do posicionamento abordados incluem a altura da camada limite do perfil do vento em cada região específica e a turbulência local, que resulta em um aumento da carga dinâmica nas torres das turbinas. Para analisar esses fatores, foram realizadas simulações em regime turbulento utilizando o software OpenFOAM®, que permitiram estimar o perfil de velocidade desenvolvido de acordo com a topografia do terreno e as características do escoamento. A fim de reduzir o tempo total da análise, as simulações foram realizadas com processamento em paralelo. Nas simulações foi utilizado o modelo de turbulência de Spalart-Allmaras, e a análise numérica foi conduzida empregando o método multigrid. O número de Reynolds, definido em  $10^5$  com base em valores da literatura, foi utilizado como parâmetro para comparação dos resultados, garantindo a validade e a eficácia do procedimento adotado. Apesar da principal limitação do estudo ser a sua aplicação a situações teóricas, onde o relevo assume uma forma periódica, a pesquisa oferece uma análise preliminar relevante, que pode servir de base para futuros estudos mais aplicados em escoamentos sobre terrenos reais e complexos. Este estudo busca não só contribuir para a compreensão dos fatores que influenciam a eficiência das turbinas eólicas, mas também propiciar avanços na otimização do aproveitamento da energia eólica, visando uma implementação mais eficaz e sustentável desta fonte de energia renovável.

**Palavras-chave:** dinâmica dos fluidos computacional, OpenFOAM, energia eólica, escoamentos turbulentos, colinas periódicas.

## ABSTRACT

GONÇALVES, Gustavo Bittar. **Simulation of Turbulent Flows over Periodic Hills Using OpenFOAM®**. 2024. 64 p. Final Paper (Graduation) – Mechanical Engineering, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2024.

The present work aims to establish a starting point for determining the optimal positioning of wind turbines on terrain characterized by a sequence of periodic hills. The determining factors for the choice of positioning addressed include the height of the boundary layer wind profile in each specific region and the local turbulence, which results in an increase in the dynamic load on the turbine towers. To analyze these factors, turbulent regime simulations were performed using the OpenFOAM® software, which allowed for the estimation of the velocity profile developed according to the terrain topography and the flow characteristics. In order to reduce the total analysis time, the simulations were carried out using parallel processing. For the simulations the Spalart-Allmaras turbulence model was used, and the numerical analysis was conducted using the multigrid method. The Reynolds number, defined at  $10^5$  based on values from the literature, was used as a parameter for result comparison, ensuring the validity and effectiveness of the adopted procedure. Despite the main limitation of the study being its application to theoretical situations, where the terrain profile is established in a periodic manner, the research offers a relevant preliminary analysis that can serve as a basis for future studies more applied to the flow over real and complex terrains. This study seeks not only to contribute to the understanding of the factors that influence the efficiency of wind turbines but also to promote advances in the optimization of wind energy utilization, aiming for a more effective and sustainable implementation of this renewable energy source.

**Keywords:** computational fluid dynamics, OpenFOAM, wind energy, turbulent flows, periodic hills.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da Capacidade Instalada (em MW). . . . .	1
Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira (em GW). . . . .	2
Figura 3 – Componentes de uma Turbina Eólica. . . . .	3
Figura 4 – Potencial Eólico Brasileiro. . . . .	3
Figura 5 – Colina a ser estudada. . . . .	4
Figura 6 – Camada Limite. . . . .	7
Figura 7 – Camada Limite Laminar e Turbulenta. . . . .	8
Figura 8 – Geometria da Colina. . . . .	12
Figura 9 – Logo do OpenFOAM®. . . . .	16
Figura 10 – Geometria da Colina. . . . .	20
Figura 11 – Malha utilizada para simulação. . . . .	21
Figura 12 – Visualização da magnitude da velocidade. . . . .	24
Figura 13 – Perfis de velocidade resultantes da simulação em regime permanente. . . . .	26
Figura 14 – Distribuição de pressão. . . . .	27
Figura 15 – Distribuição da magnitude da velocidade. . . . .	27
Figura 16 – Perfis de velocidade média ( $\bar{u}$ ). . . . .	29
Figura 17 – Perfis da intensidade da turbulência em relação ao eixo $x$ ( $\overline{u'^2}$ ). . . . .	30
Figura 18 – Perfis da intensidade da turbulência em relação ao eixo $y$ ( $\overline{v'^2}$ ). . . . .	31
Figura 19 – Tensão de Reynolds de cisalhamento entre os eixos $x$ e $y$ ( $\overline{u'v'}$ ). . . . .	32
Figura 20 – Critério Q. . . . .	33
Figura 21 – Variação de $u$ com o tempo. . . . .	34
Figura 22 – Variação de $p$ com o tempo. . . . .	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes da Função da Colina. . . . .	20
Tabela 2 – Configurações de processadores utilizadas neste trabalho. . . . .	22
Tabela 3 – Constantes do modelo Spalart-Allmaras. . . . .	23
Tabela 4 – Tempo de processamento de acordo com a paralelização. . . . .	24

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABBEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
OpenFOAM	<i>Open-source Field Operation And Manipulation</i>
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
PITM	<i>Partially Integrated Transport Model</i>
EDP	Equações Diferenciais Parciais
SA-IDDES	<i>Spalart-Allmaras Improved Delayed Detached Eddy Simulation</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
PIMPLE	Fusão de PISO e SIMPLE
AMG	<i>Algebraic Multigrid</i>
EDO	Equações Diferenciais Ordinárias

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Pe$	Potencial eólico
$\rho$	Massa específica do ar
$A$	Área varrida pelas pás do aerogerador
$V$	Velocidade do vento
$P$	Pressão atmosférica
$R$	Constante dos gases para o ar atmosférico
$u$	Componente da velocidade do escoamento no eixo $x$
$v$	Componente da velocidade do escoamento no eixo $y$
$w$	Componente da velocidade do escoamento no eixo $z$
$\nu$	Viscosidade cinemática
$\bar{u}$	Média ao longo do tempo de $u$
$u'$	Componente flutuante de $u$
$T$	Intervalo de tempo amostral
$\sigma_u$	Desvio padrão de $u$
$\tau_{ij}$	Componente da linha $i$ e da coluna $j$ do Tensor de Reynolds
$\tau$	Tensor de Reynolds
$\nu_t$	Viscosidade turbulenta
$\tilde{\nu}$	Variável de transporte do modelo Spalart-Allmaras
$f_{v1}$	Função auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$\chi$	Função auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$c_{v1}$	Constante auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$S$	Magnitude da taxa de deformação vorticidade
$d$	Distância até a parede mais próxima no escoamento
$\kappa$	Constante de von Karman

$c_{b1}$	Constante auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$c_{b2}$	Constante auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$c_{w1}$	Constante auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$\sigma$	Número de Prandtl turbulento
$f_{t2}$	Função auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$f_w$	Função auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$c_{t3}$	Constante auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$c_{t4}$	Constante auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$g$	Variável auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$r$	Variável auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$c_{w2}$	Constante auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$c_{w3}$	Constante auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$H$	Altura da colina da geometria utilizada no presente trabalho
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido
$\tilde{d}$	Comprimento de escala ajustado do modelo SA-IDDES
$\tilde{f}_d$	Função do modelo SA-IDDES
$f_e$	Função do modelo SA-IDDES
$L_{RANS}$	Função associada ao modelo RANS
$L_{LES}$	Função associada ao modelo LES
$SMALL$	Parâmetro do programa OpenFOAM®
$Q$	Critério para análise de turbulência
$\Omega$	Tensor de vorticidade
$u^*$	Predição do valor de $u$
$P^*$	Predição do valor de $P$
$A_p$	Coefficiente da equação de momentum
$p'$	Correção de pressão

$H^*$	Termo de correção da velocidade
$O(N)$	De complexidade de ordem $N$
$\Phi$	Função analisada para o método <i>backward</i>
$a_i$	Coefficiente da função que descreve a geometria da colina
$b_i$	Coefficiente da função que descreve a geometria da colina
$c_i$	Coefficiente da função que descreve a geometria da colina
$d_i$	Coefficiente da função que descreve a geometria da colina
$u_B$	Velocidade média sobre o topo da colina
$Re$	Número de Reynolds

## SUMÁRIO

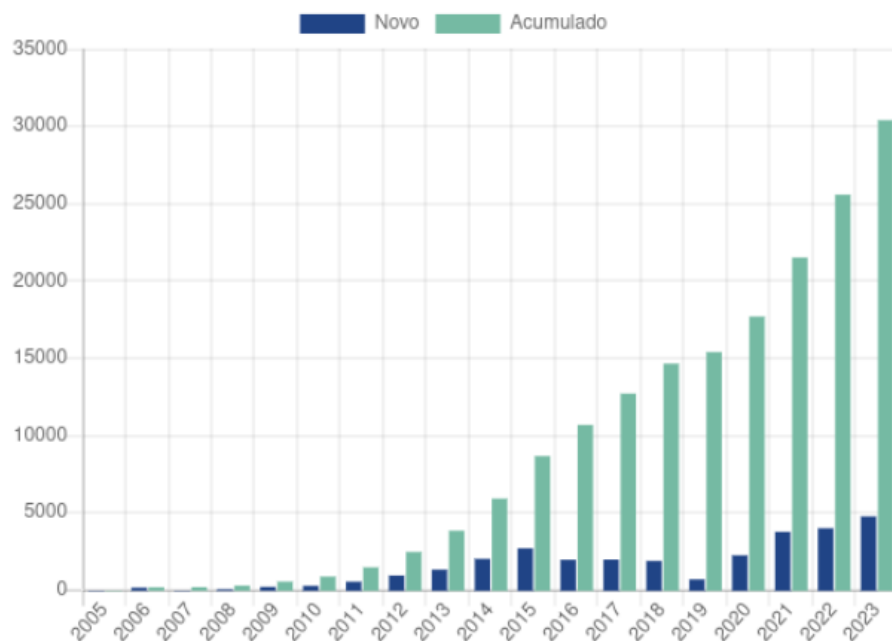
<b>1 – Introdução</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2 – Justificativa e Objetivos</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>3 – Revisão Bibliográfica</b> . . . . .	<b>6</b>
3.1 Escoamento Sobre Terrenos e Colinas . . . . .	6
3.2 Fundamentos Teóricos . . . . .	7
3.2.1 Camada Limite . . . . .	7
3.2.2 Escoamentos turbulentos . . . . .	8
3.2.2.1 Modelo de turbulência Spallart-Allmaras . . . . .	10
<b>4 – Modelagem Matemática</b> . . . . .	<b>12</b>
4.1 Modelo de Turbulência . . . . .	13
4.2 Critério Q para Análise de Turbulência . . . . .	14
<b>5 – Métodos Numéricos</b> . . . . .	<b>16</b>
5.1 Regime Permanente (Algoritmo SIMPLE) . . . . .	16
5.2 Regime Transiente (Algoritmo PIMPLE) . . . . .	17
5.3 Multigrid Geométrico . . . . .	18
5.4 Avanço no tempo <i>Backward step</i> . . . . .	19
<b>6 – Resultados e Discussões</b> . . . . .	<b>20</b>
6.1 Número de Reynolds ( $Re$ ) . . . . .	21
6.2 Configuração das Simulações em Regime Permanente . . . . .	21
6.3 Configurações das Simulações em Regime Transiente . . . . .	23
6.4 Modelo de Turbulência SA e SA-IDDES . . . . .	23
6.5 Primeira etapa - Regime Permanente . . . . .	24
6.6 Segunda Etapa - Regime Transiente . . . . .	26
6.6.1 Velocidade média ( $\bar{u}$ ) . . . . .	29
6.6.2 Intensidade da Turbulência no Eixo $x$ ( $\overline{u'^2}$ ) . . . . .	30
6.6.3 Intensidade da turbulência em relação ao eixo $y$ ( $\overline{v'^2}$ ) . . . . .	31
6.6.4 Tensão de Reynolds de cisalhamento entre os eixos $x$ e $y$ ( $\overline{u'v'}$ ) . . . . .	32
6.6.5 Critério Q . . . . .	33
6.6.6 Avaliação da variação de $u$ e $p$ ao longo do tempo de simulação . . . . .	34
<b>7 – Conclusão</b> . . . . .	<b>36</b>
<b>Referências</b> . . . . .	<b>38</b>

<b>APÊNDICE A</b> –Arquivo <i>blockMeshDict</i> . . . . .	<b>42</b>
<b>APÊNDICE B</b> –Arquivo <i>controlDict</i> - Regime Permanente . . . . .	<b>47</b>
<b>APÊNDICE C</b> –Arquivo <i>fvSolution</i> . . . . .	<b>49</b>
<b>APÊNDICE D</b> –Arquivo <i>k</i> - Regime Permanente . . . . .	<b>51</b>
<b>APÊNDICE E</b> –Arquivo <i>nut</i> - Regime Permanente . . . . .	<b>52</b>
<b>APÊNDICE F</b> –Arquivo <i>nuTilda</i> - Regime Permanente . . . . .	<b>53</b>
<b>APÊNDICE G</b> –Arquivo <i>p</i> - Regime Permanente . . . . .	<b>54</b>
<b>APÊNDICE H</b> –Arquivo <i>U</i> - Regime Permanente . . . . .	<b>55</b>
<b>APÊNDICE I</b> – Arquivo <i>turbulenceProperties</i> - Regime Permanente . . . . .	<b>56</b>
<b>APÊNDICE J</b> –Arquivo <i>transportProperties</i> . . . . .	<b>57</b>
<b>APÊNDICE K</b> –Arquivo <i>decomposeParDict</i> . . . . .	<b>58</b>
<b>APÊNDICE L</b> –Arquivo <i>fvSchemes</i> - Regime Transiente . . . . .	<b>59</b>
<b>APÊNDICE M</b> –Arquivo <i>turbulenceProperties</i> - Regime Transiente . . . . .	<b>61</b>
<b>APÊNDICE N</b> –Arquivo <i>controlDict</i> - Regime Transiente . . . . .	<b>63</b>

## 1 Introdução

A energia eólica tem se destacado como uma das fontes de energia renovável mais promissoras e sustentáveis no cenário global. No Brasil, o potencial eólico é de particular relevância devido às condições climáticas favoráveis e à extensa costa litorânea, que proporciona ventos constantes e de alta intensidade. O Brasil ocupa atualmente uma posição de destaque na produção de energia eólica, sendo um dos países com maior crescimento nesse setor nos últimos anos (ABBEEÓLICA, 2024), como pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 1.

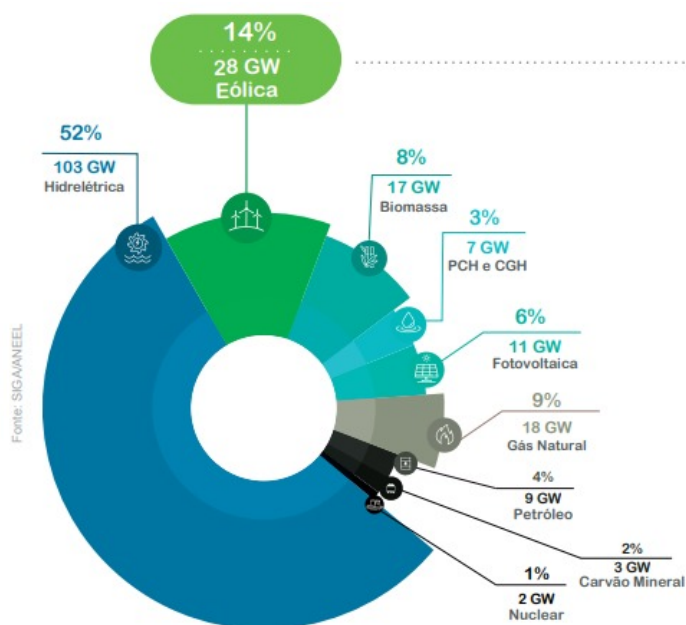
Figura 1 – Evolução da Capacidade Instalada (em MW).



Fonte: ABBEEólica (2024).

A energia eólica é uma alternativa viável e limpa, que contribui significativamente para a diversificação da matriz energética brasileira e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), a capacidade instalada de energia eólica no Brasil ultrapassou os 30 gigawatts (GW) em 2023, representando cerca de 14% da matriz elétrica nacional, como ilustrado no gráfico apresentado na Figura 2. Esse crescimento se deve, em grande parte, ao investimento em tecnologias de conversão de energia eólica e ao desenvolvimento de políticas públicas favoráveis à expansão do setor.

Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira (em GW).



A energia solar possui mais 24,7 GW de capacidade instalada em geração distribuída

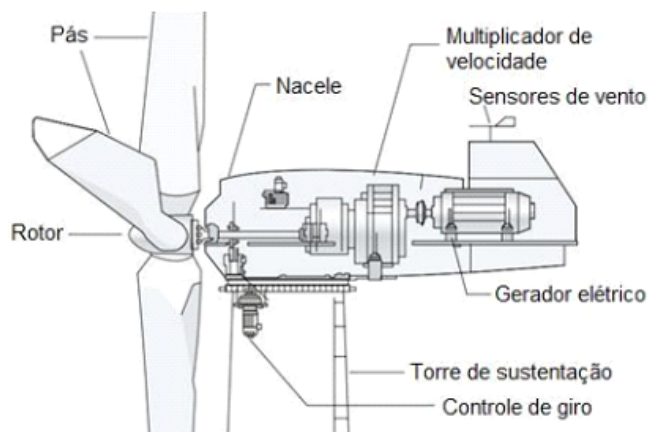
Fonte: ABBEÓlica (2024).

Uma turbina eólica é uma máquina que converte a energia cinética do vento em energia elétrica. Ela é composta por várias partes principais, incluindo as pás, o rotor, o eixo, o gerador e a torre. As pás são estruturas aerodinâmicas que captam o vento e transferem a sua energia para o rotor. O rotor é conectado a um eixo que gira e aciona um gerador, transformando a energia mecânica em energia elétrica. A torre sustenta todo o conjunto, elevando as pás a uma altura onde os ventos são mais fortes e consistentes. A estrutura básica e os componentes de uma turbina eólica estão ilustrados na Figura 3.

Um parque eólico é um conjunto de turbinas eólicas instaladas em uma área específica para a produção de energia elétrica. Essas turbinas são posicionadas estrategicamente para otimizar a captura de energia do vento e minimizar a interferência mútua. A instalação de um parque eólico requer um estudo detalhado do potencial eólico do local, que envolve a medição da velocidade e direção do vento, bem como a análise de dados climáticos históricos. Esses estudos são essenciais para garantir que o parque eólico seja economicamente viável e eficiente na produção de energia.

Conhecer o potencial eólico de uma região é fundamental para o planejamento e a implementação de parques eólicos. Isso envolve o uso de modelos matemáticos e simulações para estimar a disponibilidade e a intensidade do vento ao longo do tempo. Com essas informações, é possível determinar o número ideal de turbinas, seu posicionamento e a altura das torres, maximizando a geração de energia e garantindo o

Figura 3 – Componentes de uma Turbina Eólica.

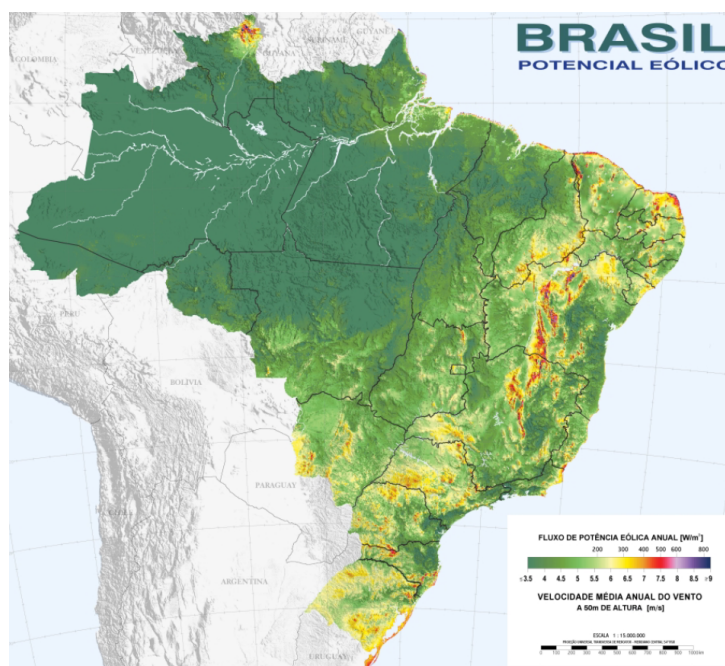


Fonte: Telub (2022).

retorno sobre o investimento.

O Brasil apresenta um elevado potencial eólico, especialmente nas regiões Nordeste e Sul, onde as condições de vento são ideais para a geração de energia, como pode se observar na Figura 4. Com um potencial de 1500 GW *onshore* e *offshore* o Brasil ocupa o sexto lugar no Ranking Global de Capacidade Instalada *onshore* (AB-BEEÓLICA, 2024).

Figura 4 – Potencial Eólico Brasileiro.



Fonte: Amarante et al. (2001).

Para calcular ou estimar o potencial eólico local é imprescindível o estudo da

camada limite. Além disso trata-se de um fenômeno físico vital para a engenharia mecânica, aerodinâmica, hidráulica e outras disciplinas que lidam com o escoamento de fluidos. Em aerodinâmica, por exemplo, a espessura e o comportamento da camada limite influenciam diretamente nas forças de arrasto e de sustentação em asas de aeronaves, impactando a eficiência e o desempenho do voo. Na engenharia de recursos hídricos, a camada limite afeta a distribuição de velocidade em canais e condutos, influenciando a perda de carga e a capacidade de transporte de sedimentos (MUNSON et al., 2016).

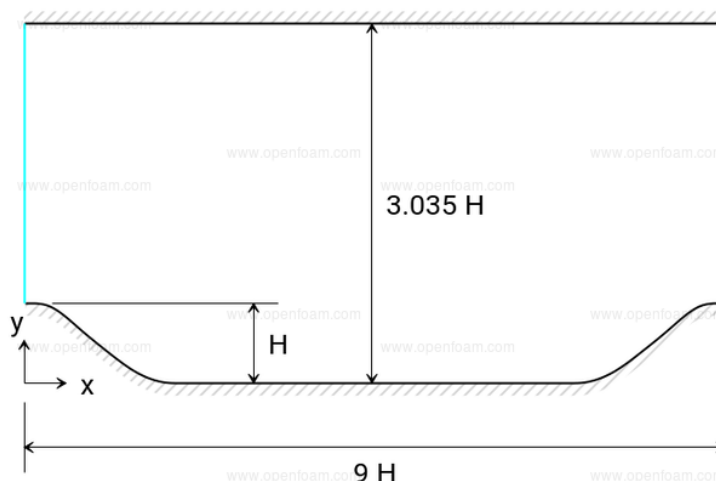
A modelagem precisa da camada limite é crucial para o desenvolvimento de tecnologias eficientes e inovadoras, como veículos de alta velocidade, posicionamento e dimensionamento de turbinas eólicas e sistemas de resfriamento. O domínio das técnicas de análise da camada limite permite a otimização de projetos e a redução de custos operacionais, promovendo avanços tecnológicos e a sustentabilidade em diversas áreas industriais e científicas (POPE, 2000).

A compreensão desses escoamentos é essencial para projetos que envolvem estruturas urbanas, como edifícios e pontes, onde o impacto do vento precisa ser adequadamente previsto para garantir segurança e eficiência estrutural (SHIH et al., 1995).

Além disso, escoamentos sobre obstáculos são cruciais em aplicações de energia renovável, como a modelagem das esteiras turbilhonares formadas a jusante de turbinas eólicas em parques eólicos, onde a interação entre a turbina e a camada limite atmosférica afeta diretamente a eficiência da geração de energia (CASTRO; PORTÉ-AGEL, 2019).

A Figura 5 apresenta um esquema do problema abordado por este trabalho, no qual está o eixo  $x$  ao longo da horizontal, o eixo  $y$  vertical, direcionado para cima e o eixo  $z$  na direção do plano da imagem. A origem do sistema de coordenadas está estabelecida ao centro da colina, na altitude do solo.

Figura 5 – Colina a ser estudada.



Fonte: (OPENCDF, 2018).

## 2 Justificativa e Objetivos

Sabendo da crescente demanda para instalação de parques eólicos, conhecer o potencial eólico de um dado terreno é obrigatório para dimensionar tanto turbinas quanto os próprios parques eólicos de forma a aproveitar ao máximo a disponibilidade energética local.

Então, propõe-se, no presente trabalho como objetivo geral estimar o potencial eólico, através do levantamento de perfis de velocidade provindos do desenvolvimento da camada limite. Para tanto, utiliza-se do programa OpenFOAM® para analisar escoamentos sobre colinas com diferentes condições de velocidade de vento, de forma a gerar a camada limite e posteriormente obter o relativo potencial eólico. Como objetivos específicos tem-se:

- Aprender a usar o software OpenFOAM® para realizar simulações de escoamentos incompressíveis sobre objetos;
- Realizar simulações de escoamentos sobre colinas;
- Estimar o potencial eólico local do escoamento ao longo da colina.

### 3 Revisão Bibliográfica

#### 3.1 Escoamento Sobre Terrenos e Colinas

O estudo conduzido no presente trabalho tem três pilares, a Dinâmica dos Fluidos Computacional ou CFD utilizando o programa OpenFOAM®, o modelo de turbulência Spalart-Allmaras e o desenvolvimento de um escoamento sobre um relevo determinado. Diante destes itens existe uma vasta literatura a partir da qual foram elencados os fatores para o desenvolvimento do trabalho.

O trabalho de Santos (2022) aborda simulações computacionais utilizando o software OpenFOAM®. O autor discute a modelagem matemática necessária para simular escoamentos sobre terrenos planos, incluindo a aplicação das equações de Navier-Stokes e o uso do modelo de turbulência Spalart-Allmaras. O estudo de Santos (2022) também aborda a validação dos resultados simulados comparando-os com dados experimentais.

Breuer et al. (2009) apresenta simulações utilizando os métodos Simulações Numéricas Diretas (DNS) e Simulações de Grandes Vórtices (LES), com ênfase em técnicas de discretização e análise de estabilidade de algoritmos numéricos. O autor aborda também o impacto das condições de contorno na precisão das simulações. Vale ressaltar que no trabalho de Breuer et al. (2009) a geometria utilizada é a mesma da utilizada no presente trabalho.

O artigo "*Hybrid RANS/LES simulations of the turbulent flow over periodic hills at high Reynolds number using the PITM method*" de Chaouat e Schiestel (2013) apresenta uma aplicação do método de modelagem de transporte parcialmente integrada (PITM) para simulações híbridas RANS/LES de escoamentos turbulentos sobre colinas periódicas bidimensionais em números de Reynolds altos ( $Re = 37.000$ ). Utilizando um modelo de transporte de tensões submalha derivado do PITM, o estudo de Chaouat e Schiestel (2013) investiga o impacto do refinamento da malha nos resultados e os compara com dados experimentais. Os autores demonstram que as simulações PITM, mesmo em malhas grosseiras, reproduzem com precisão o escoamento turbulento complexo, superando os modelos RANS tradicionais em vários aspectos, e proporcionando uma redução significativa nos custos computacionais (CHAOUAT; SCHIESTEL, 2013).

Xiao et al. (2020) investiga, para escoamentos sobre a mesma geometria de Breuer et al. (2009) e do presente trabalho, a modelagem matemática de escoamentos turbulentos, apresentando estudos de caso que aplicam modelos de turbulência complexos. O autor também discute a importância da escolha correta dos modelos de turbulência para diferentes tipos de escoamentos.

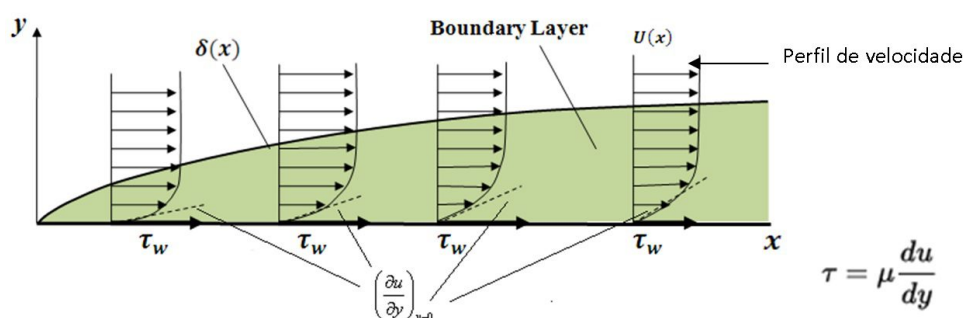
Lee (2016) por sua vez discute em seu trabalho variações apresentadas nos resultados de simulações realizadas com um diferente número de processadores, mesmo se tratando das mesmas condições de controle, do mesmo modelo de turbulência, dos mesmos métodos de resolução e da mesma forma de iteração no tempo. Este aspecto é apresentado no presente estudo na parte das simulações do regime permanente. Lee (2016) investiga a discrepância numérica entre cálculos seriais e paralelos utilizando a Interface de Passagem de Mensagens (MPI) em simulações numéricas. Dois problemas principais foram considerados: a equação de Burgers unidimensional e um problema de movimento de líquidos bidimensional em um domínio retangular, ambos resolvidos utilizando o OpenFOAM®.

## 3.2 Fundamentos Teóricos

### 3.2.1 Camada Limite

A formação da camada limite é um fenômeno fundamental na dinâmica dos fluidos, com implicações significativas em diversas áreas da engenharia e ciências aplicadas. Introduzido por Ludwig Prandtl em 1904, o conceito de camada limite refere-se à região próxima a uma superfície sólida onde os efeitos viscosos dominam o comportamento do escoamento, resultando em um gradiente de velocidade que varia da condição de não-deslizamento na superfície até a velocidade do escoamento livre distante dela (PRANDTL, 1904).

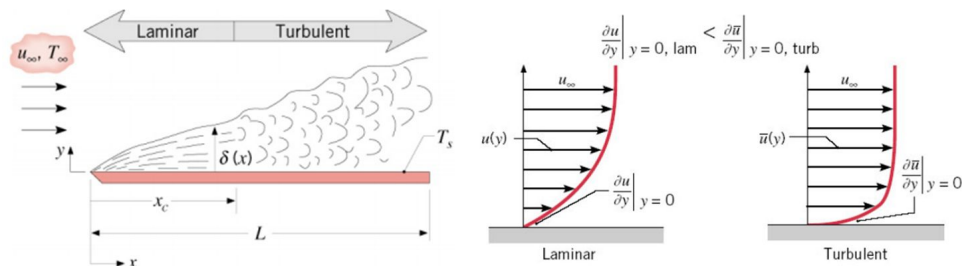
Figura 6 – Camada Limite.



Fonte: Pequeno (2020).

Ilustrada pela Figura 6, a camada limite é a região onde a velocidade do fluido muda de zero, diretamente na superfície devido à condição de não-deslizamento, até alcançar aproximadamente 99% da velocidade de escoamento livre a uma certa distância da superfície. Esta região é crítica para a análise de problemas de escoamento, pois nela ocorrem variações significativas das propriedades do fluido, como velocidade, temperatura e pressão. A compreensão e modelagem da camada limite são essenciais para prever e controlar fenômenos como arrasto em aeronaves, transferência de calor

Figura 7 – Camada Limite Laminar e Turbulenta.



Fonte: Pequeno (2020).

em trocadores de calor e perda de energia em sistemas hidráulicos (SCHLICHTING; GERSTEN, 2017).

A camada limite pode ser classificada como laminar ou turbulenta, conforme ilustrado na Figura 7. Na camada limite laminar, o escoamento do fluido é suave e ordenado, com as partículas de fluido movendo-se em trajetórias paralelas. Este tipo de escoamento é caracterizado por um baixo número de Reynolds, onde os efeitos viscosos são predominantes e as forças inerciais são desprezíveis (WHITE, 2021). A camada limite laminar é descrita por equações diferenciais parciais que refletem a simplicidade e a previsibilidade do escoamento do fluido, como as Equações de Prandtl (Equações 3.1 e 3.2) em um escoamento incompressível, sem efeitos gravitacionais e em regime permanente:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.2)$$

onde  $u$  e  $v$  são as componentes de velocidade nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente, e  $\nu$  é a viscosidade cinemática.

Por outro lado, na camada limite turbulenta, o escoamento é altamente desordenado e caracterizado por movimentos aleatórios e misturas intensas de fluidos. A transição de uma camada limite laminar para uma turbulenta é um processo complexo que ocorre em um número de Reynolds crítico, onde as forças inerciais superam os efeitos viscosos. Este tipo de escoamento é descrito por equações mais complexas que exigem modelos numéricos avançados para sua solução (ANDERSON, 2017).

### 3.2.2 Escoamentos turbulentos

A análise estatística de escoamentos turbulentos é fundamental para compreender a complexidade e a variabilidade desses fenômenos. Em escoamentos turbulentos, a velocidade de um fluido em um ponto específico não é constante, mas sim uma função altamente variável do tempo. Para descrever essa variabilidade, a veloci-

dade instantânea  $u(t)$  pode ser decomposta em duas componentes: uma componente média  $\bar{u}$  e uma componente flutuante  $u'$ .

Esta abordagem é descrita em detalhe no livro “Turbulent Flows” de Pope (2000), que é uma referência clássica na área. A decomposição é formalmente expressa pela Equação 3.3.

$$u(t) = \bar{u} + u' \quad (3.3)$$

Neste equacionamento,  $\bar{u}$  é a velocidade média ao longo do tempo, e é calculada segundo a Equação 3.4.

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (3.4)$$

onde  $T$  é um intervalo de tempo suficientemente grande para capturar todas as escalas temporais relevantes do escoamento turbulento.

Ao passo que  $u'$  é a flutuação de velocidade, que é dada pela diferença  $u(t) - \bar{u}$ . É comum no estudo de escoamentos turbulentos avaliar a intensidade da turbulência como a variância da componente flutuante da velocidade do escoamento, que acaba sendo definida pela média de  $(u')^2$ , ou seja,  $\overline{u'^2}$ , calculado pela Equação 3.5.

$$\overline{u'^2} = \sigma_u^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (u(t) - \bar{u})^2 dt \quad (3.5)$$

É importante ressaltar que a notação  $u$  é comumente adotada para a componente da velocidade do eixo  $x$ , enquanto se usa  $v$  para a componente do eixo  $y$  e  $w$  para componente do eixo  $z$ . Levando isso em consideração, todo o raciocínio aplicado na definição do parâmetro  $u'$  também se aplica aos análogos  $v'$  e  $w'$ . Com isso em mente pode-se abordar outro aspecto analisado em escoamentos turbulentos, as tensões de Reynolds.

As tensões de Reynolds constituem um tensor, a forma como é definida cada componente é explicitada a seguir. Primeiramente é conveniente mudar a notação das velocidades utilizada para notação  $(u_1, u_2, u_3)$ , a qual é equivalente a  $(u, v, w)$ , cada componente do tensor de Reynolds é calculada conforme a Equação 3.6.

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} = \frac{1}{T} \int_0^T (u_i(t) - \bar{u}_i)(u_j(t) - \bar{u}_j) dt \quad (3.6)$$

Deste modo o tensor fica, na sua forma matricial, conforme apresentado na Equação 3.7.

$$\tau = \begin{bmatrix} \overline{u_1'^2} & \overline{u_1' u_2'} & \overline{u_1' u_3'} \\ \overline{u_2' u_1'} & \overline{u_2'^2} & \overline{u_2' u_3'} \\ \overline{u_3' u_1'} & \overline{u_3' u_2'} & \overline{u_3'^2} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Vale observar que as componentes da diagonal principal deste tensor constituem em tensões normais, a medida que as demais componentes constituem em tensões cisalhantes. Enquanto os valores da diagonal principal traduzem a intensidade da turbulência em cada direção, e sua soma é equivalente ao dobro da energia cinética turbulenta do escoamento, os demais valores traduzem a quantidade de momento turbulento que está ocorrendo entre diferentes direções.

### 3.2.2.1 Modelo de turbulência Spalart-Allmaras

Para simular escoamentos turbulentos uma das principais ferramentas são os modelos de turbulência, especificamente, no presente trabalho, utilizou-se o modelo de Spalart-Allmaras. O modelo de turbulência Spalart-Allmaras é um modelo de equação de uma única variável usado para simular escoamentos turbulentos, especialmente em aplicações de escoamentos sobre superfícies e objetos. Este modelo é conhecido por sua simplicidade e eficiência em termos computacionais, sendo amplamente utilizado para escoamentos com grandes gradientes de pressão adverso e camadas limites que são submetidas a decolamento e respectiva formação da esteira turbilhonar.

A viscosidade turbulenta  $\nu_t$  é um conceito central em modelos de turbulência e representa a difusividade adicional causada pela presença de turbulência no escoamento. No modelo Spalart-Allmaras, a viscosidade turbulenta é calculada a partir de uma variável de transporte  $\tilde{\nu}$ , que é uma viscosidade cinemática turbulenta modificada.

A relação entre a viscosidade turbulenta  $\nu_t$  e a variável de transporte  $\tilde{\nu}$  é dada por:

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1} \quad (3.8)$$

onde  $f_{v1}$  é uma função que depende da razão entre a viscosidade turbulenta modificada  $\tilde{\nu}$  e a viscosidade cinemática molecular  $\nu$ :

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3} \quad (3.9)$$

$$\chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad (3.10)$$

Na Equação 3.9,  $c_{v1}$  é uma constante do modelo.

A evolução temporal e espacial da variável  $\tilde{\nu}$  é governada por uma equação de transporte, que inclui termos de produção, difusão e destruição. A equação de transporte para  $\tilde{\nu}$  é dada por:

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} = c_{b1}(1 - f_{t2})S\tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma} \left[ \nabla \cdot ((\nu + \tilde{\nu})\nabla \tilde{\nu}) + c_{b2}(\nabla \tilde{\nu})^2 \right] - \left( c_{w1}f_w - \frac{c_{b1}}{\kappa^2}f_{t2} \right) \left( \frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 \quad (3.11)$$

onde:

- $S$  é a magnitude da taxa de deformação vorticidade,
- $d$  é a distância até a parede mais próxima,
- $\kappa$  é a constante de von Karman,
- $c_{b1}, c_{b2}, c_{w1}$  são constantes do modelo,
- $\sigma$  é o número de Prandtl turbulento,
- $f_{t2}$  e  $f_w$  são funções de transição e destruição, respectivamente.

As funções  $f_{t2}$  e  $f_w$  são definidas da seguinte maneira:

$$f_{t2} = c_{t3} \exp(-c_{t4}\chi^2) \quad (3.12)$$

onde  $c_{t3}$  e  $c_{t4}$  são constantes do modelo, e  $\chi = \tilde{\nu}/\nu$ .

A função  $f_w$  é dada por:

$$f_w = g \left[ \frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6} \right]^{1/6} \quad (3.13)$$

onde,  $c_{w2}$  e  $c_{w3}$  são constantes do modelo e:

$$g = r + c_{w2}(r^6 - r) \quad (3.14)$$

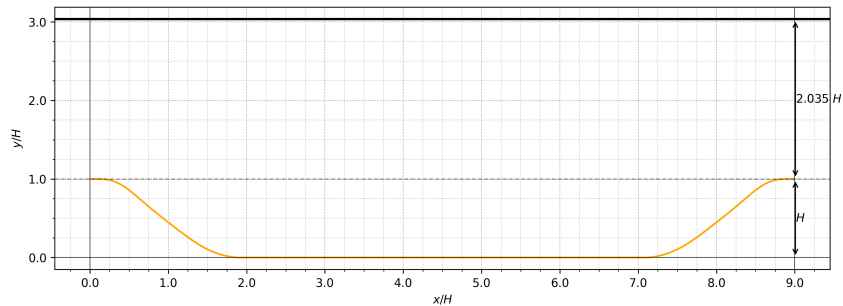
$$r = \frac{\tilde{\nu}}{S\kappa^2 d^2} \quad (3.15)$$

A viscosidade turbulenta  $\nu_t$  proporciona um meio para modelar os efeitos dissipativos e de mistura da turbulência sem a necessidade de resolver todas as escalas do escoamento turbulento diretamente. Ela age aumentando a difusividade molecular, permitindo que os modelos de turbulência capturem os efeitos macroscópicos da turbulência de maneira computacionalmente eficiente.

## 4 Modelagem Matemática

O objeto de estudo deste trabalho é o escoamento sobre colinas periódicas segundo a geometria apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Geometria da Colina.



Fonte: Próprio Autor.

Com o objetivo de analisar o escoamento em estudo e inferir sua solução são necessárias equações que servem para modelar matematicamente o problema. Para gerar o equacionamento necessário para resolução do problema proposto neste trabalho foi realizada uma divisão do domínio analisado em diversos volumes de controle, e para cada um destes tem-se um conjunto de Equações Diferenciais Parciais (EDP's) que acabam por ser válidas para qualquer ponto do escoamento avaliado. A resolução destas EDP's fornecem detalhes sobre o comportamento de velocidade, pressão, massa específica, e outras propriedades do escoamento ao longo do domínio estudado.

Em diversos problemas da Mecânica dos Fluidos a resolução do conjunto de equações diferenciais provenientes do balanço de massa (Equação da Continuidade) e do balanço de momento linear (Equações de Navier-Stokes) é suficiente para determinação das características de escoamentos incompressíveis sem transferência de energia térmica. Tais equações são ditas acopladas, ou seja, possuem variáveis em comum, o que implica na necessidade de uma resolução simultânea das equações obtidas.

A equação da continuidade (Equação 4.1) modela matematicamente que a taxa de variação de massa dentro de um volume de controle é igual à subtração entre o fluxo de massa que entra e o fluxo de massa que sai do volume de controle. Desde que a hipótese do meio contínuo seja respeitada, nesta aplicação, chega-se à formulação apresentada na Equação 4.1 (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.1)$$

onde  $\rho$  é a massa específica,  $\vec{V}$  é o vetor velocidade e  $t$  é o tempo.

Para coordenadas cartesianas, considerando um escoamento incompressível, a Equação 4.1 pode ser reduzida para a Equação 4.2, que é exatamente a equação que será resolvida no presente trabalho.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.2)$$

onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  são as componentes da velocidade nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente.

As equações de Navier-Stokes, nomeadas em homenagem ao engenheiro francês Louise Marie Navier (1785-1836) e ao matemático inglês Sir George Gabriel Stokes (1819-1903), as quais traduzem a aplicação da Segunda Lei de Newton a um volume de controle. Estas equações traduzem que a força total agindo em um volume de controle deve ser igual a taxa na qual o momento muda dentro deste volume de controle acrescida da subtração entre o fluxo de momento que sai e o fluxo de momento que entra neste volume. Quando aplica-se este equacionamento em um volume de controle infinitesimal chegamos à formulação apresentada na Equação 4.3 (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{V} \quad (4.3)$$

onde  $\frac{D\vec{V}}{Dt}$  indica a derivada total da velocidade,  $P$  indica a pressão,  $\vec{g}$  indica a aceleração gravitacional e  $\mu$  indica a viscosidade dinâmica do fluido. Para regime permanente, a Equação 4.3 toma a forma apresentada na Equação 4.4:

$$\vec{V}\nabla\vec{V} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{V} \quad (4.4)$$

#### 4.1 Modelo de Turbulência

O modelo *Spalart-Allmaras Improved Delayed Detached Eddy Simulation* (SA-IDDES) é amplamente utilizado em simulações onde é necessário capturar detalhes de escoamentos turbulentos complexos, como em estudos de aerodinâmica de veículos e previsão de escoamentos em torno de obstáculos, onde a transição suave entre regimes RANS e LES é crucial para a precisão dos resultados (POPE, 2000). Diante disso, este foi o modelo adotado no presente trabalho.

O modelo SA-IDDES é uma extensão do modelo original de Spalart-Allmaras, desenvolvido para melhorar a simulação de escoamentos turbulentos através de uma abordagem híbrida que combina os métodos RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) e LES (Large Eddy Simulation) (SPALART; ALLMARAS, 1994; SPALART, 2009). Este modelo é projetado para transitar suavemente entre os regimes de RANS e LES, realizando automaticamente o ajuste às características do escoamento e à resolução da malha (SHUR et al., 2008).

Para transitar entre os modos RANS e LES, o modelo SA-IDDES introduz um comprimento de escala ajustado,  $\tilde{d}$ , que considera a resolução da malha (GRITSKEVICH et al., 2012):

$$\tilde{d} = \max(\tilde{f}_d(1 + f_e)L_{RANS} + (1 - \tilde{f}_d)L_{LES}, SMALL) \quad (4.5)$$

onde:

- $\tilde{f}_d$  e  $f_e$  são funções do modelo;
- $L_{RANS}$  é uma função associada ao modelo RANS;
- $L_{LES}$  é uma função associada ao modelo LES;
- $SMALL$  é um parâmetro externo ao modelo acrescido em função de restrições computacionais do software. (OPENCDF, 2024d)

## 4.2 Critério Q para Análise de Turbulência

A análise de estruturas coerentes em escoamentos turbulentos é fundamental para a compreensão dos mecanismos de transporte e mistura em fluidos. Uma ferramenta amplamente utilizada para identificar tais estruturas é o critério Q, proposto por Hunt, Wray e Moin (1988). Este critério baseia-se na decomposição da derivada da velocidade em termos de tensores de rotação (vorticidade) e alongamento (deformação).

O critério Q é definido como a diferença entre a intensidade de rotação e a intensidade de deformação de um fluido. Matematicamente, ele é expresso como:

$$Q = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) \quad (4.6)$$

onde:

- $\Omega$  é o tensor de vorticidade,
- $S$  é o tensor de deformação.

Os tensores de vorticidade  $\Omega$  e deformação  $S$  são definidos a partir do gradiente de velocidade  $\nabla \mathbf{u}$  da seguinte maneira:

$$\nabla \mathbf{u} = \mathbf{S} + \mathbf{\Omega} \quad (4.7)$$

onde:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T), \quad \mathbf{\Omega} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} - \nabla \mathbf{u}^T) \quad (4.8)$$

O critério Q distingue regiões onde a rotação do escoamento domina sobre a deformação. Em termos físicos, um valor positivo de  $Q$  indica a presença de uma estrutura coerente ou turbilhonar, onde a rotação é mais significativa do que a deformação. Por outro lado, um valor negativo de  $Q$  sugere que a deformação é dominante, caracterizando regiões onde não há estruturas turbilhonares coerentes bem definidas.

Na análise de escoamentos turbulentos, o critério Q é usado para identificar e visualizar estruturas coerentes. Estas estruturas são fundamentais para o entendimento dos processos de transferência de massa, quantidade de movimento e energia em escoamentos turbulentos. O uso do critério Q em simulações numéricas e experimentos facilita a detecção de regiões de intensa atividade rotacional, fornecendo uma avaliação valiosa sobre a dinâmica do escoamento.

## 5 Métodos Numéricos

Figura 9 – Logo do OpenFOAM®.



Fonte: OpenCFD (2024a).

A escolha de utilizar o OpenFOAM® (cujo logo está apresentado na Figura 9) como *software* para as simulações foi feita com base em três fatores. Em primeiro lugar foi considerado o fato de se tratar de um *software* de código aberto, o que viabilizaria a realização de alterações no código caso estas se mostrassem necessárias. Em segundo, trata-se de um programa gratuito, a ausência de um custo associado à execução das simulações se mostra um fator positivo não apenas para o presente trabalho mas se faz um grande facilitador da repetibilidade do que foi proposto. Em terceiro, o OpenFOAM® é de uso livre, o que implica em uma grande versatilidade em seu uso, não apenas para o presente estudo, mas para eventuais aplicações que poderiam ou não ter valor comercial.

O nome OpenFOAM® vem de *Open-source Field Operation And Manipulation*, o *software* é programado em C++ e é publicamente armazenado no GitLab, o programa oferece um conjunto abrangente de ferramentas de pré-processamento, processamento e pós-processamento, além de bibliotecas para simular diversos cenários, como escoamentos incompressíveis e compressíveis, turbulência e transferência de calor, otimização, acústica, reações químicas, mecânica dos sólidos e eletromagnetismo. (OPENCFD, 2024a)

Para realização das simulações do presente trabalho, foi realizada uma divisão em duas etapas, uma em regime permanente, e uma em regime transiente. A ideia foi fazer um número baixo de iterações com as condições de contorno e condições iniciais em regime permanente utilizando as Equações de Continuidade (Equação 4.2) e de Navier-Stokes para regime permanente (Equação 4.4), gerando um comportamento médio do escoamento a fim de aproximar condições para serem consideradas as iniciais em uma simulação com mais iterações em um regime transiente.

### 5.1 Regime Permanente (Algoritmo SIMPLE)

O método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) é uma técnica iterativa amplamente utilizada para resolver a Equação 4.4 em escoamen-

tos. O método se baseia em uma série de suposições e correções para determinar os campos de pressão e de velocidade no domínio de interesse.

O método SIMPLE segue os seguintes passos:

- 1 **Predição de Campos de Velocidade e Pressão:** Inicialmente, são feitas suposições iniciais para os campos de pressão  $P^*$  e velocidade  $\mathbf{u}^*$ .
- 2 **Resolução das Equações de Momento (Equação 4.4):** Utilizando a pressão suposta  $P^*$ , resolve-se as equações de momento para obter um campo de velocidade intermediário  $\mathbf{u}^*$ :

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{u}^*(P^*) \quad (5.1)$$

- 3 **Correção de Pressão:** A Equação de Continuidade (Equação 4.2) é utilizada para corrigir a pressão e a velocidade. A equação de correção de pressão é derivada da equação de continuidade e da equação de Navier-Stokes (Equação 4.4):

$$\nabla \cdot \mathbf{u}^* = 0 \quad (5.2)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^* - \frac{\nabla P'}{\rho} \quad (5.3)$$

- 4 **Correção de Velocidade:** A velocidade corrigida (Equação 5.3) é obtida a partir da pressão corrigida ( $P'$ ).
- 5 **Iteração:** Os passos de 2 a 4 são repetidos até que a convergência seja alcançada.

## 5.2 Regime Transiente (Algoritmo PIMPLE)

O algoritmo PIMPLE é uma técnica híbrida utilizada na dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para a resolução de problemas de escoamento tanto incompressível quanto compressível. O PIMPLE combina as vantagens dos métodos SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) e PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), proporcionando uma abordagem robusta e eficiente para a simulação de escoamentos complexos.

Uma das principais vantagens do PIMPLE é sua flexibilidade e eficiência em lidar com diferentes tipos de escoamentos. Ele é amplamente utilizado em diversas aplicações, desde a modelagem de escoamentos industriais complexos até a simulação de fenômenos naturais, devido à sua capacidade de resolver problemas não lineares e instáveis de forma robusta (ANDRIULLI et al., 2024).

A necessidade de algoritmos como o PIMPLE surge da complexidade inerente aos problemas de escoamento, onde o acoplamento entre a pressão e a velocidade é fundamental para garantir a conservação de massa e momento. O método SIMPLE é conhecido por sua estabilidade em escoamentos estacionários, enquanto o PISO é preferido para escoamentos transientes devido à sua capacidade de lidar com grandes

passos de tempo. O PIMPLE, por sua vez, integra essas duas abordagens, permitindo o uso flexível tanto em simulações estacionárias quanto transientes.

O algoritmo PIMPLE opera por meio de um ciclo iterativo que combina as correções de pressão e velocidade de maneira a assegurar a convergência rápida e a acurácia na solução das equações de Navier-Stokes. Esse ciclo pode ser resumido nas seguintes etapas:

- 1 **Predição de Velocidade:** Uma predição inicial da velocidade  $\mathbf{u}^*$  é feita usando a pressão do passo de tempo anterior ou inicial;
- 2 **Correção de Pressão:** A pressão é corrigida para garantir que a predição de velocidade satisfaça a continuidade, resolvendo a equação de pressão:

$$\nabla \cdot \left( \frac{\nabla p'}{A_p} \right) = \nabla \cdot \mathbf{H}^* \quad (5.4)$$

onde  $p'$  é a correção de pressão,  $A_p$  é o coeficiente da equação de momentum, e  $\mathbf{H}^*$  é um termo de correção de velocidade;

- 3 **Atualização da Velocidade:** A velocidade é atualizada com a correção de pressão obtida:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^* - \frac{\Delta t}{A_p} \nabla p' \quad (5.5)$$

- 4 **Correção de Velocidade (PISO):** Em problemas transientes, é realizada uma correção adicional de velocidade para melhorar a precisão, o que caracteriza a parte PISO do método.
- 5 **Iteração até Convergência:** O processo é repetido até que a solução convirja para um critério de tolerância predefinido.

### 5.3 Multigrid Geométrico

O método multigrid ou multinível é utilizado para resolver diversos tipos de problemas matemáticos com  $N$  incógnitas em  $O(N)$  operações, enquanto, métodos clássicos de soluções de sistemas lineares envolvem  $O(N^2)$  operações. (WESSELING; OOSTERLEE, 2001). Como discutido em Wesseling e Oosterlee (2001), isso se aplica a diversas áreas, como equações integrais ou métodos de otimização em várias disciplinas científicas. A complexidade de  $O(N)$  operações foi demonstrada teoricamente para discretizações de uma ampla classe de equações diferenciais parciais lineares elípticas.

Pode-se distinguir entre multigrid algébrico (AMG) e multigrid geométrico. No multigrid algébrico, não se utiliza informação sobre a malha em que as equações diferenciais parciais governantes são discretizadas. Portanto, seria mais apropriado falar em métodos multinível algébricos. No multigrid geométrico, malha grosseiras são construídas a partir da malha fina dada, e correções de malha grosseira são computadas

usando sistemas discretos construídos nas malha grosseiras (WESSELING; OOSTERLEE, 2001).

Para o presente trabalho foi utilizado o multigrid geométrico implementado no programa OpenFOAM®. Mais detalhes podem ser observados no Apêndice C.

#### 5.4 Avanço no tempo *Backward step*

O método adotado para o avanço no tempo foi o *Backward step*, também conhecido como Método de Euler Implícito, é um método numérico utilizado para a solução de equações diferenciais ordinárias (EDOs). Diferente do Método de Euler Explícito, que utiliza a inclinação da função no ponto atual para avançar para o próximo ponto, o Método de Euler Implícito utiliza a inclinação no ponto futuro, resultando em um método implicitamente definido (PATANKAR, 1980).

O método backward de avanço no tempo é dado pela Equação 5.6 (OPENCDFD, 2024b):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Phi) = \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{3}{2}\Phi - 2\Phi^0 + \frac{1}{2}\Phi^{00} \right) \quad (5.6)$$

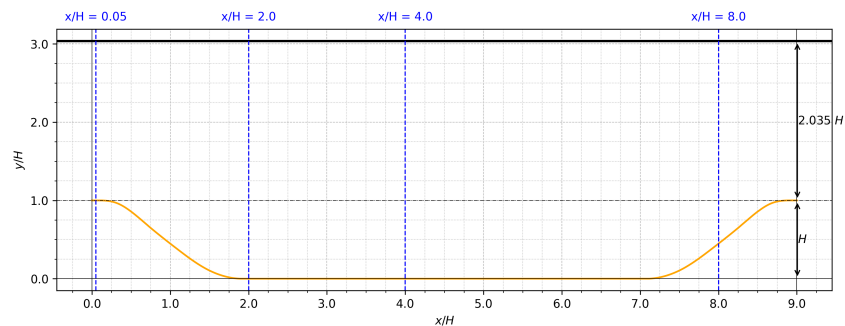
onde  $\Phi$  é a função analisada, e os expoentes 0 indicam uma volta na iteração, ou seja, um 0 indica a iteração passada, e dois significam duas iterações atrás.

Uma característica importante do método *backward* é sua estabilidade. Ele é particularmente útil para resolver problemas rígidos, onde métodos explícitos podem exigir passos de tempo muito pequenos para manter a estabilidade. No entanto, a desvantagem é que o método implícito geralmente requer a solução de um sistema de equações não lineares a cada passo de tempo, o que pode ser computacionalmente intensivo.

## 6 Resultados e Discussões

Conforme explicado anteriormente, as simulações referentes ao presente trabalho foram realizadas para escoamentos sobre uma geometria de colinas, com condições de contorno tais quais estas colinas foram consideradas periódicas. Especificamente, a geometria da colina utilizada é conforme a Figura 10.

Figura 10 – Geometria da Colina.



Fonte: Próprio Autor.

Neste contexto, o valor de  $H$  é de  $28 \text{ mm}$ . A curvatura da colina é obtida utilizando a Equação 6.1, expressa em milímetros, tanto para  $y$  quanto para  $x$ .

$$y(x) = \begin{cases} \min(1, a_1 + b_1x + c_1x^2 + d_1x^3) & 0 \leq x < 9 \\ a_2 + b_2x + c_2x^2 + d_2x^3 & 9 \leq x < 14 \\ a_3 + b_3x + c_3x^2 + d_3x^3 & 14 \leq x < 20 \\ a_4 + b_4x + c_4x^2 + d_4x^3 & 20 \leq x < 30 \\ a_5 + b_5x + c_5x^2 + d_5x^3 & 30 \leq x < 40 \\ \max(0, a_6 + b_6x + c_6x^2 + d_6x^3) & 40 \leq x < 54 \end{cases} \quad (6.1)$$

Os coeficientes desta equação estão apresentados na Tabela 1.

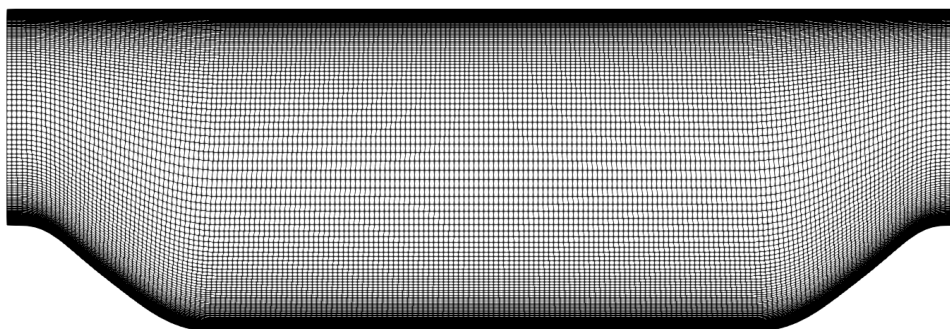
Tabela 1 – Coeficientes da Função da Colina.

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>
<b>1</b>	28.000	0.000	$6.775 \times 10^{-3}$	$-2.125 \times 10^{-3}$
<b>2</b>	25.074	0.975	$-1.016 \times 10^{-1}$	$1.890 \times 10^{-3}$
<b>3</b>	25.796	0.821	$-9.055 \times 10^{-2}$	$1.627 \times 10^{-3}$
<b>4</b>	40.464	-1.380	$1.946 \times 10^{-2}$	$-2.070 \times 10^{-4}$
<b>5</b>	17.924	0.874	$-5.567 \times 10^{-2}$	$6.278 \times 10^{-4}$
<b>6</b>	56.390	-2.011	$1.645 \times 10^{-2}$	$2.675 \times 10^{-5}$

Fonte: (OPENCFO, 2018).

Posteriormente, essa geometria foi dividida em 200 partes ao longo do eixo  $x$ , 160 ao longo do eixo  $y$  e 80 no eixo  $z$ , gerando uma malha com 2560000 volumes. A divisão foi feita de forma que a malha ficasse mais refinada próximo às superfícies superior e inferior, sendo a inferior a responsável por representar as colinas, e mais grosseira a medida que se afasta destas, como pode-se observar na Figura 11.

Figura 11 – Malha utilizada para simulação.



Fonte: Próprio Autor.

A codificação para geração da geometria e da malha pode ser verificada no Apêndice A. Neste mesmo arquivo são estipuladas as condições de contorno, considerando que tanto a superfície superior, quanto a superfície inferior do modelo são paredes, e que é imposta uma condição de periodicidade entre a face de entrada e a face de saída, e também entre as faces frontal e traseira, esta última condição é denominada *cyclic* e é ela que determina que o modelo simula escoamentos sobre colinas periódicas indefinidamente.

### 6.1 Número de Reynolds ( $Re$ )

O número de Reynolds pretendido para este trabalho era de 10595, de forma a permitir a comparação dos resultados com o trabalho executado por Breuer et al. (2009), calculado pela Equação 6.2, considerando  $u_B$  como a velocidade média logo no topo da colina, chega-se a um valor de 10624,74. Idealmente seriam feitos ajustes para aproximar o valor ao pretendido, entretanto, o alto custo computacional do processo de simulação restringiu essa possibilidade, de forma que foi decidido realizar a comparação mesmo ciente de que há uma diferença neste fator.

$$Re = \frac{u_B H}{\nu} \quad (6.2)$$

### 6.2 Configuração das Simulações em Regime Permanente

Para a parte da simulação em regime permanente, foi determinado o uso do algoritmo SIMPLE, conforme apresentado na Seção 5.1, e foram realizadas 1500 itera-

ções. A configuração do número de iterações e do método utilizado podem ser verificados no arquivo apresentado no Apêndice B.

Além de determinar o número de iterações e o algoritmo, deve-se determinar o método de solução, que no caso foi o *multigrid* geométrico, conforme apresentado na Seção 5.3, e a tolerância a ser adotada para determinar o fim de cada iteração, a determinação destes fatores pode ser observada no Apêndice C.

Ademais, deve-se observar as condições iniciais e de contorno para as equações diferenciais a serem resolvidas. As condições iniciais adotadas para este caso foram todas uniformes na entrada, a velocidade inicial adotada foi horizontal com um valor de  $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ . Todos os arquivos necessários para configuração destas condições iniciais e de contorno estão apresentados nos Apêndices D, E, F, G e H.

Seguindo o processo, deve-se também determinar o modelo de turbulência a ser adotado, conforme apresentado na Seção 4.1, o modelo adotado foi o Spalart-Allmaras. A definição do modelo utilizado é observada no arquivo apresentado no Apêndice I. Outra característica a ser determinada é a viscosidade do fluido que para o presente estudo foi determinada como  $2,643 \times 10^{-6}$ , a definição desse valor foi feita no arquivo apresentado no Apêndice J.

Uma etapa adicional é determinar o número de processadores a serem utilizados pela aplicação e a forma de divisão da malha dentre os processadores. Esta configuração é determinada por um arquivo tal como o apresentado no Apêndice K. Para este trabalho foi realizado um estudo do ganho de tempo de acordo com o número de processadores, e com a forma com que é feita a divisão da malha. Considerando que a representação  $(a \ b \ c)$  implica em uma divisão em  $a$  partes ao longo do eixo  $x$ ,  $b$  no eixo  $y$  e  $c$  no eixo  $z$ , e cientes de que o produto de  $a$ ,  $b$  e  $c$  deve ser igual ao número de processadores a serem utilizados, para simulações em regime permanente foram realizadas as configurações apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Configurações de processadores utilizadas neste trabalho.

Número de Processadores	Divisão
1 (Processamento em série)	(1 1 1)
2	(2 1 1)
3	(3 1 1)
4	(4 1 1)
4	(2 2 1)
5	(5 1 1)

Fonte: Próprio Autor.

Conforme previsto na literatura, houve diferença entre os resultados obtidos com um número diferente de processadores (LEE, 2016), entretanto, neste trabalho, optou-se por adotar o método de menor tempo de execução para realização das simulações em regime transiente, que acaba sendo a mais dispendiosa.

### 6.3 Configurações das Simulações em Regime Transiente

Ao comparar as configurações computacionais no OpenFOAM® de uma simulação em regime transiente às configurações para uma simulação em regime permanente há quatro alterações a serem feitas. Primeiro deve-se acrescentar a forma de avanço no tempo, que no caso foi determinada como a *backward*, conforme apresentado na Seção 5.4, essa definição é feita no arquivo apresentado no Apêndice L. Segundo, deve-se alterar o modelo de turbulência utilizado, neste caso, conforme apresentado na Seção 4.1, foi utilizado o modelo SA-IDDES, a definição deste modelo é feita no arquivo apresentado no Apêndice M. Terceiro, deve-se alterar o número de iterações e o passo, neste caso a simulação foi realizada para 10 s com um passo de  $1 \times 10^{-4}$  s totalizando portanto 100000 iterações no tempo. Em quarto, deve-se alterar o algoritmo de solução para o PIMPLE, conforme apresentado na Seção 5.2, tanto a definição das iterações quanto a alteração do algoritmo são apresentados no arquivo do Apêndice N.

### 6.4 Modelo de Turbulência SA e SA-IDDES

Para determinação do modelo de turbulência, tanto para o modelo SA quanto para o modelo SA-IDDES, é necessária a definição das constantes presentes no equacionamento apresentado na Seção 4.1. Os valores utilizados no presente trabalho são determinados no próprio código fonte, embora caso fosse necessário ou interessante seria viável a realização de alterações nesses valores por se tratar de um código aberto. Os valores utilizados pelo código são listados conforme a publicação original do modelo (SPALART; ALLMARAS, 1994). A influência destes parâmetros no resultado não foi objeto de estudo do presente trabalho, e os valores utilizados para as constantes estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Constantes do modelo Spalart-Allmaras.

Constante	Valor Atribuído
$C_{v1}$	7,1
$\kappa$	0,41
$C_{b1}$	0,1355
$C_{b2}$	0,622
$C_{w1}$	3,239
$\sigma$	2/3
$C_{t3}$	1,2
$C_{t4}$	0,5
$C_{w2}$	0,3
$C_{w3}$	2

Fonte: Adaptado de (OPENCDF, 2024c).

### 6.5 Primeira etapa - Regime Permanente

Conforme esperado, de acordo com a literatura, as diferentes configurações de paralelização do processamento da simulação incorreram em resultados diferentes (LEE, 2016). O presente trabalho não abordou essa diferença, e foi adotada a configuração de menor tempo de execução para realização da simulação em regime transiente, cujo tempo de processamento dificultaria a avaliação de mais de uma configuração possível. O tempo levado por cada configuração está apresentado na Tabela 4, na última coluna desta tabela está apresentada a economia de tempo (percentual) em relação ao processamento em série.

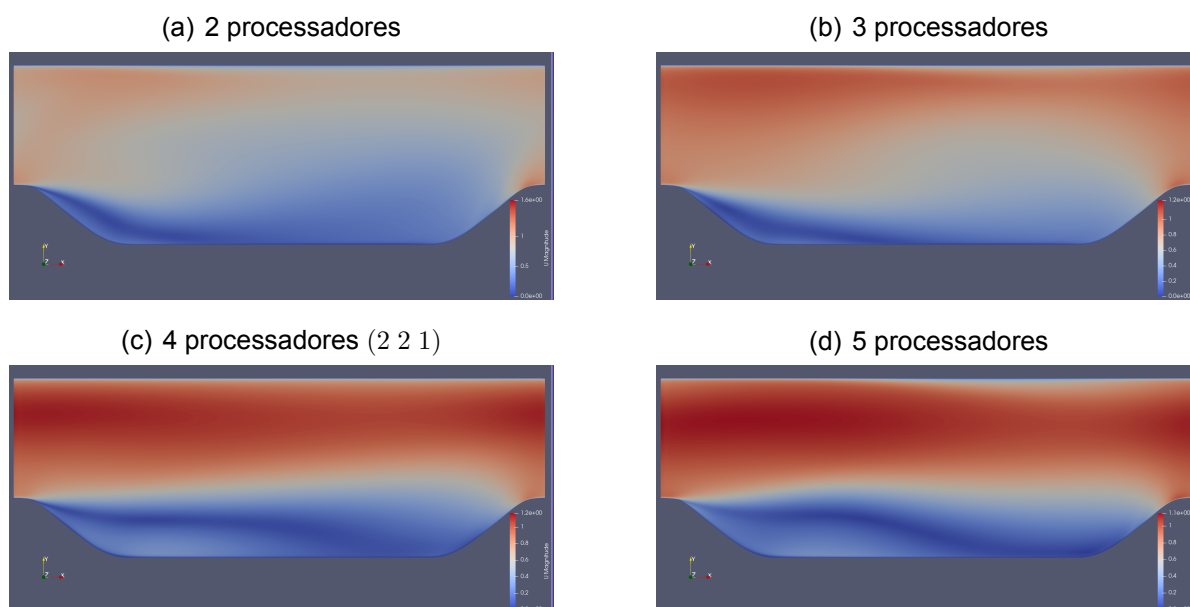
Tabela 4 – Tempo de processamento de acordo com a paralelização.

Número de Processadores	Divisão	Tempo (s)	Economia (%)
1	(1 1 1)	10534	0%
2	(2 1 1)	6332	38,89%
3	(3 1 1)	6099	42,10%
4	(4 1 1)	5671	46,16%
4	(2 2 1)	5534	47,47%
5	(5 1 1)	5588	46,95%

Fonte: Próprio Autor.

As diferenças nos resultados são consideráveis, e podem ser observadas na Figura 12.

Figura 12 – Visualização da magnitude da velocidade.



Fonte: Próprio Autor.

No OpenFOAM®, assim como em outros códigos computacionais, ao realizar a divisão do domínio, a resolução dos sistemas lineares é realizada em cada subdomínio independentemente e, apenas ao final do processo de convergência, as informações são trocadas entre os domínios, o que leva as diferenças apresentadas na Figura 12.

Conforme estabelecido, o resultado utilizado para a etapa de regime transiente foi o obtido com a divisão da malha no formato (2 2 1), utilizando quatro processadores. A análise do perfil de velocidade para o presente trabalho foi realizada ao longo de quatro eixos, definidos conforme o trabalho de Breuer et al. (2009), de forma a possibilitar uma comparação dos resultados com valores de referência. Estes eixos foram estabelecidos na vertical e posicionados no centro da malha em relação ao eixo  $z$  em  $x$  nas seguintes posições, conforme ilustrado na Figura 10:

- Posição 1:  $x/H = 0,05$ ;
- Posição 2:  $x/H = 2$ ;
- Posição 3:  $x/H = 4$ ;
- Posição 4:  $x/H = 8$ .

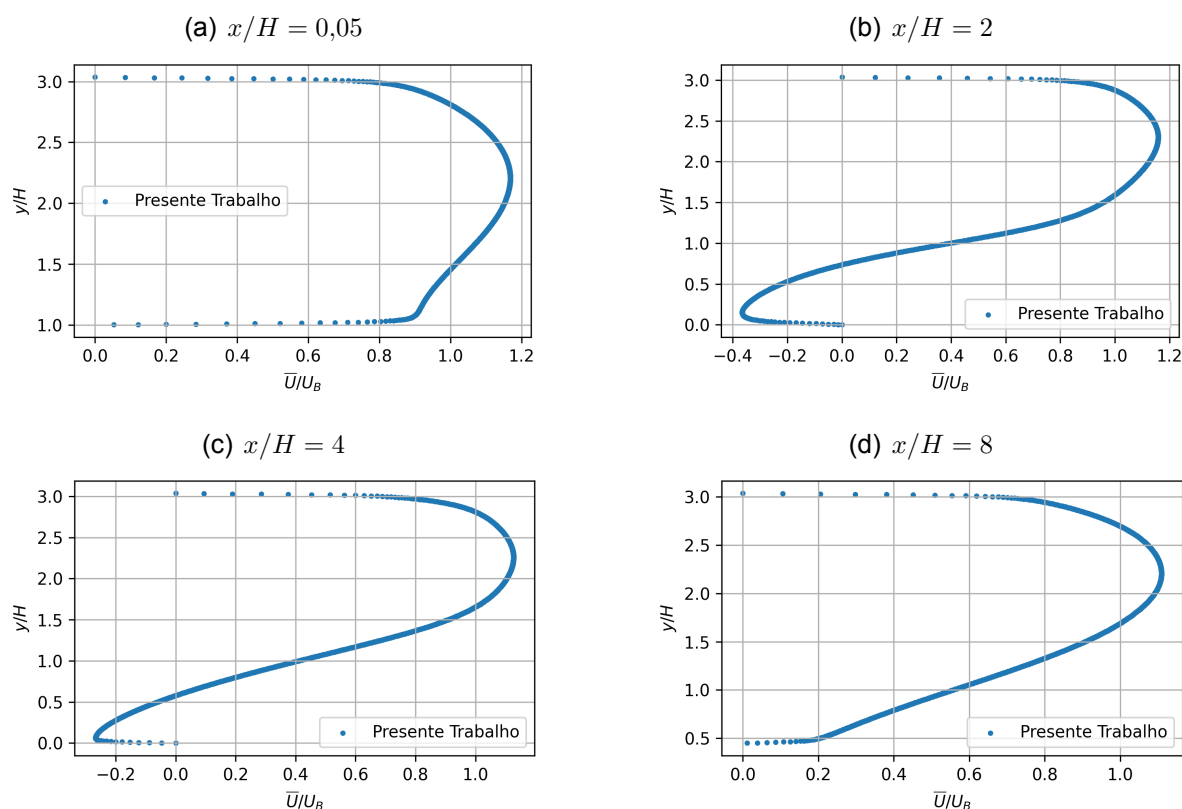
Para análise dos resultados as escalas dos eixos foram adimensionalizadas, em  $y$  foi utilizada a dimensão  $H$  e para velocidade ( $\bar{u}$ ) foi utilizada a velocidade média calculada exatamente no topo da colina ( $u_B$ ), o valor obtido para  $u_B$  foi de  $1,0029 \text{ m/s}$ . Os perfis de velocidade nos eixos citados podem ser observados na Figura 13.

A partir dos gráficos da Figura 13, observa-se que, conforme poderia se esperar perante o estabelecimento da colina como um obstáculo ao escoamento, são atingidas maiores velocidades em alturas referentes ao solo inferiores quando se situa no topo da colina, se comparado com os demais posicionamentos.

Na posição  $x/H = 0,05$  é possível observar que o escoamento tem velocidade maior que a velocidade máxima no topo da colina, atingindo  $\bar{u}/u_B = 1,8$ . Em  $x/H = 2$  e  $x/H = 4$ , que correspondem a posições que já se encontram na base inferior do domínio de cálculo, observa-se que há velocidades negativas, indicando que há escoamento no sentido oposto ao escoamento acima da colina, gerado por um gradiente adverso de pressão, caracterizando que há uma recirculação que ocupa essa região. Já no perfil mostrado em  $x/H = 8$ , posição situada na subida da colina, já houve o recolamento do escoamento, e a camada limite volta a se formar de acordo com um gradiente favorável de pressão.

Entretanto, para uma avaliação mais precisa e abrangente deve-se observar o comportamento turbulento do escoamento, que não pode ser obtido a partir de uma análise em regime permanente devido ao seu comportamento aleatório. A fim de viabilizar o estudo por completo, se faz necessária a realização de uma análise em regime transiente, que é o próximo tópico a ser tratado.

Figura 13 – Perfis de velocidade resultantes da simulação em regime permanente.



Fonte: Próprio autor.

## 6.6 Segunda Etapa - Regime Transiente

De acordo com o que foi dito a simulação para o regime transiente foi realizada com quatro processadores, utilizando a repartição (2 2 1) da malha. Como era de se esperar devido ao maior número de iterações, o tempo de execução desta simulação foi consideravelmente maior, totalizando 923374 segundos ou seja 10 dias 16 horas 29 minutos e 34 segundos, a máquina utilizada tem o processador Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @ 2.60GHz com 6 núcleos, e 16Gb de memória RAM, com o sistema operacional Ubuntu 22.04.4 LTS. O alto tempo de processamento foi o principal limitador do escopo deste projeto, que idealmente seria composto pela análise de um conjunto maior de simulações composto de uma variação de condições iniciais e de contorno para permitir um estudo mais detalhado do comportamento deste tipo de escoamento.

No tempo final de simulação, a distribuição de pressão instantânea ao longo do domínio se estabeleceu conforme apresentado na Figura 14.

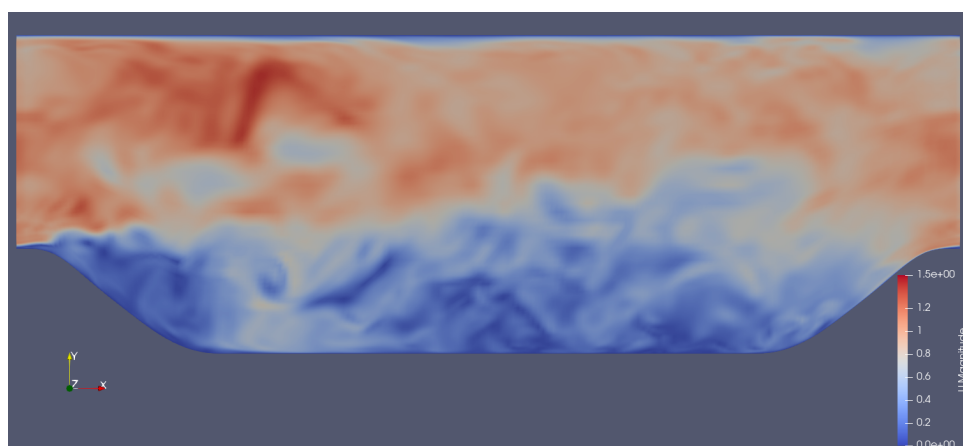
Figura 14 – Distribuição de pressão.



Fonte: Próprio Autor.

Já a distribuição da magnitude da velocidade ficou conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Distribuição da magnitude da velocidade.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 14, a partir do topo da colina posicionada mais a esquerda, é possível ver uma região de variação positiva e negativa de pressão caracterizada pela mudança de coloração entre azul (negativa) e vermelho (positiva). Essa região é onde se tem a liberação de turbilhões. Na região entre as colinas, é possível verificar que a pressão é negativa a jusante da colina esquerda e positiva a montante da colina a direita, ou seja, o escoamento, está submetido a um gradiente adverso de pressão, i.e., o escoamento está no sentido contrário a queda de pressão, esse fato pode promover o descolamento da camada limite.

Na Figura 15, observa-se que os valores mais altos da magnitude de velocidade estão na região acima do topo da colina, região de mais alto potencial eólico. E próximo a superfície entre as colinas, a velocidade diminui, ou seja, do ponto de vista

da energia eólica, há menos potencial de energia disponível. Por exemplo, uma turbina posicionada entre duas colinas, nas proporções apresentadas na Figura 6, teria pouco potencial eólico disponível. Observando a velocidade na região a montante da colina posicionada à direita, observa-se um aumento da velocidade na porção de ascensão, antes de atingir o topo da colina.

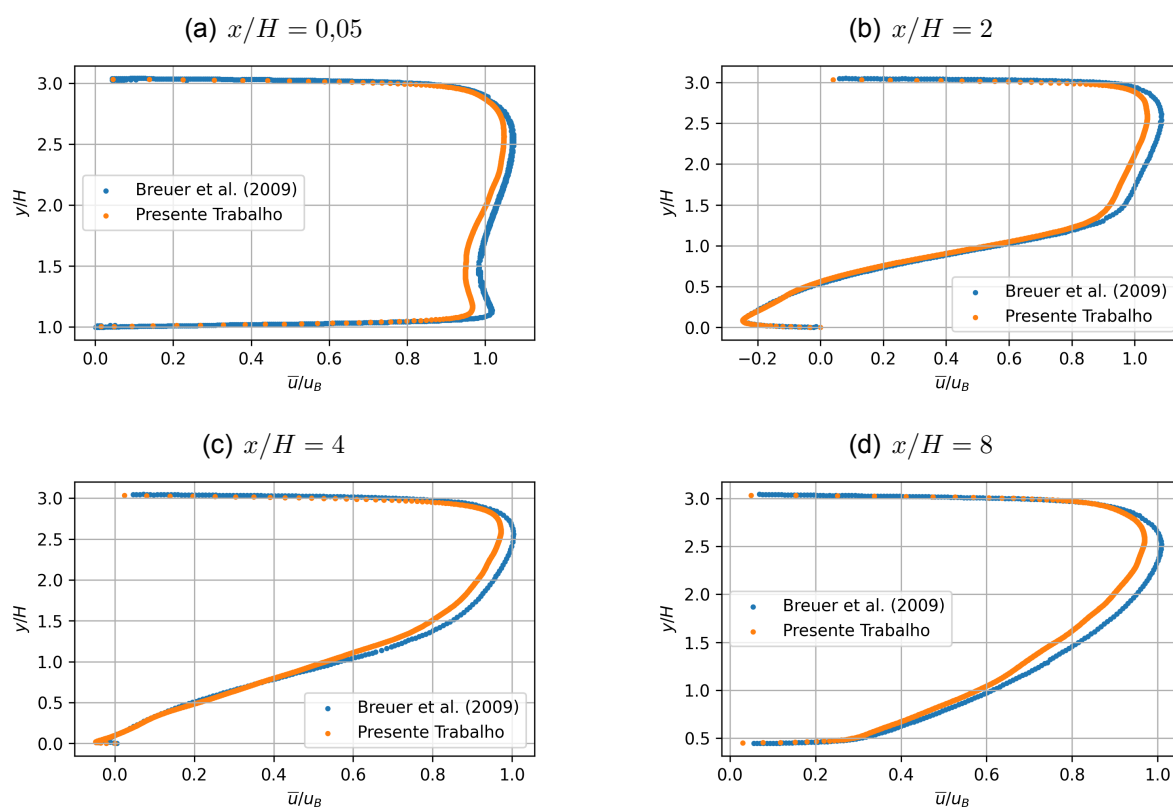
Em consonância com o estabelecido anteriormente, foi observado o comportamento do escoamento nas posições propostas anteriormente, com a razão  $x/H$  variando entre 0,05; 2; 4 e 8. As características do escoamento de interesse do presente estudo foram estabelecidas como:

- Velocidade média ( $\bar{u}$ );
- Intensidade da turbulência em relação ao eixo  $x$ ;
- Intensidade da turbulência em relação ao eixo  $y$ ;
- Tensão de Reynolds de cisalhamento entre os eixos  $x$  e  $y$ ;
- Critério Q;
- Variação da velocidade na direção  $x$  ( $u$ ) de acordo com o tempo na posição  $x/H = 0,05$  e  $y/H = 1$ ;
- Variação da pressão ( $p$ ) de acordo com o tempo na posição  $x/H = 0,05$  e  $y/H = 1$ ;

6.6.1 Velocidade média ( $\bar{u}$ )

Os gráficos apresentando as velocidades médias obtidas no presente trabalho e na referência Breuer et al. (2009) ao longo dos quatro eixos pré-estabelecidos podem ser observados na Figura 16.

Figura 16 – Perfis de velocidade média ( $\bar{u}$ ).



Fonte: Próprio autor e Adaptado de (BREUER et al., 2009).

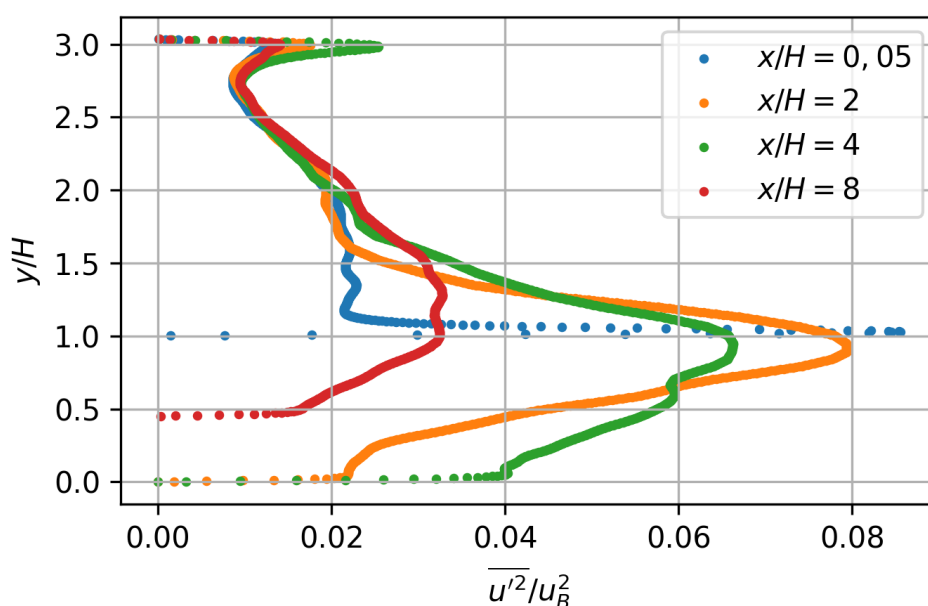
Os resultados apresentados na Figura 16 mostram que há uma proximidade dos valores e uma similaridade nos perfis de velocidade obtidos neste trabalho quando comparados ao trabalho executado por Breuer et al. (2009). Este fato corrobora para validação do modelo e dos métodos utilizados, ainda mais se for considerado o fato de que se tratam de números de Reynolds diferentes entre estes perfis.

A análise destes gráficos também evidencia que, quanto ao posicionamento de turbinas eólicas, a região próxima ao topo da colina se faz mais atrativa do ponto de vista de potencial eólico, dado que o perfil desenvolve velocidades mais elevadas a alturas menores, o que implicaria numa redução da altura, e consequentemente do custo da estrutura das torres construídas. Este resultado é coerente com o cenário estabelecido visto que o posicionamento de sucessivas colinas consiste na colocação de uma série infinita de obstáculos ao escoamento o que acarreta no descolamento da camada limite após cada colina, incorrendo numa elevação da altura necessária para o escoamento atingir velocidades mais elevadas.

### 6.6.2 Intensidade da Turbulência no Eixo $x$ ( $\overline{u'^2}$ )

Utilizando os mesmo eixos de referência descritos ao longo deste trabalho foi obtido o gráfico apresentado na Figura 17, neste caso, a adimensionalização do eixo  $x$  foi realizada pelo termo  $u_B^2$ .

Figura 17 – Perfis da intensidade da turbulência em relação ao eixo  $x$  ( $\overline{u'^2}$ ).



Fonte: Próprio autor.

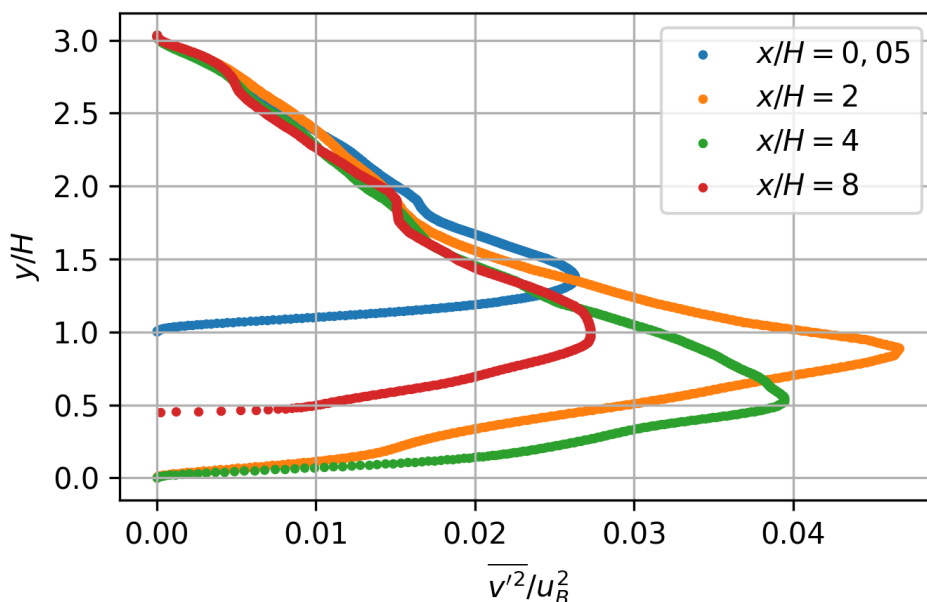
No gráfico da Figura 17 pode-se observar que, para as diferentes posições analisadas, a intensidade da turbulência tende a ser mais intensa ao longo de alturas mais próximas da altura da colina. Vê-se também que para o posicionamento próximo ao topo da colina, para  $x/H = 0,05$ , tem-se um valor médio inferior, embora seja o que possui o maior pico.

Este valor representa esforços de carácter oscilatório, gerando vibrações nas torres eólicas, e influenciam portanto no dimensionamento e na vida útil destas estruturas. Analisando o conjunto dos gráficos das Figuras 16 e 17, tem-se ainda que o melhor posicionamento para uma turbina eólica seria no topo da colina, e com uma altura suficiente para superar o pico da intensidade de turbulência  $\overline{u'^2}$  apresentado.

### 6.6.3 Intensidade da turbulência em relação ao eixo $y$ ( $\overline{v'^2}$ )

O comportamento de  $v'^2$  é descrito pelo gráfico apresentado na Figura 18, cujo eixo  $x$  foi adimensionalizado, tal como na Seção anterior, pelo fator  $u_B^2$ .

Figura 18 – Perfis da intensidade da turbulência em relação ao eixo  $y$  ( $\overline{v'^2}$ ).



Fonte: Próprio Autor.

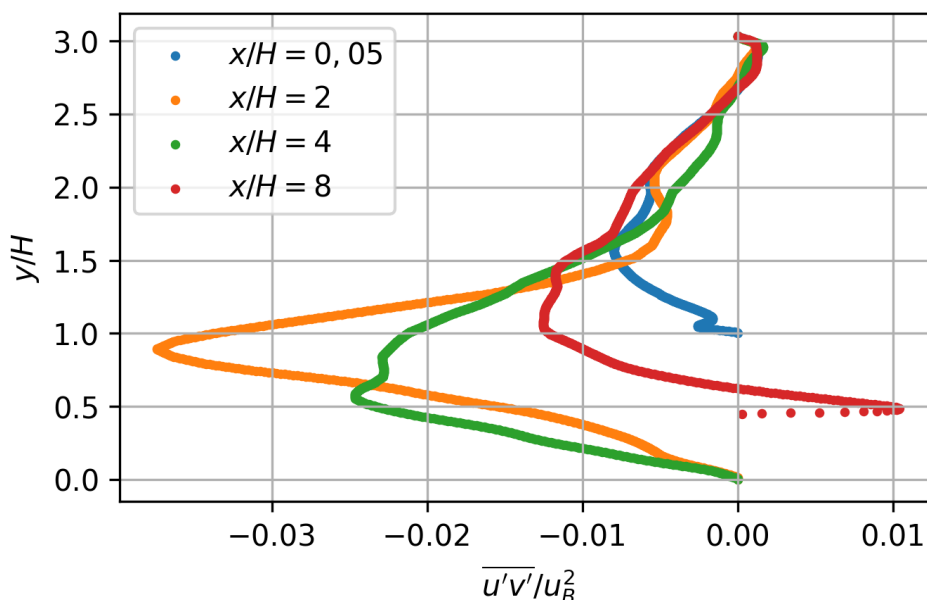
Analogamente ao que ocorre para  $\overline{u'^2}$ , os valores de  $v'^2$  traduzem os esforços de carácter oscilatório, entretanto, neste caso, tratam-se de esforços verticais. A rigor a consideração deste fator se faz menos relevante se comparado aos esforços ao longo do eixo  $x$  por se tratar de uma situação em que a área projetada em relação ao eixo é consideravelmente inferior.

Apesar disso, a observação do comportamento deste parâmetro corrobora com o que foi apresentado pelas figuras anteriores (Figuras 16 e 17), uma vez que os valores observados para o posicionamento mais próximo ao pico está dentre os menores.

#### 6.6.4 Tensão de Reynolds de cisalhamento entre os eixos $x$ e $y$ ( $\overline{u'v'}$ )

A Figura 19 apresenta os resultados obtidos para os valores de  $\overline{u'v'}$ , cujo eixo  $x$  também foi adimensionalizado pelo fator  $u_B^2$ .

Figura 19 – Tensão de Reynolds de cisalhamento entre os eixos  $x$  e  $y$  ( $\overline{u'v'}$ ).



Fonte: Próprio autor.

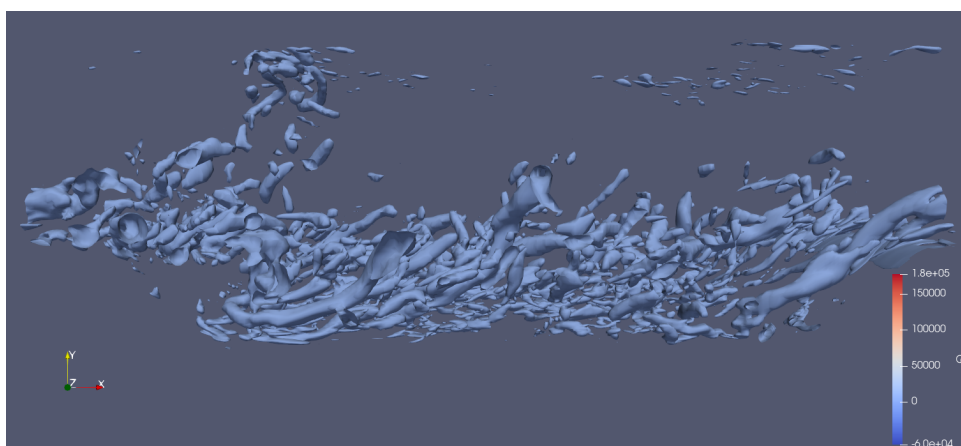
Estes resultados estão de acordo com o esperado do ponto de vista que usualmente, quando se trata de problemas de desenvolvimento de uma camada limite, os valores mais próximos à superfície tendem a ser negativos que indicam que o fluido está realizando transporte de quantidade de movimento para longe da superfície e aumentando o arrasto turbulento (POPE, 2000).

A análise destes valores não diz muito sobre esforços permanentes ou oscilatórios na estrutura de torres eólicas, visto que estes apenas traduzem os esforços cisalhantes do fluido (no caso ar).

### 6.6.5 Critério Q

A Figura 20 apresenta um gráfico gerado no pós-processamento dos resultados, utilizando o software ParaView representando superfícies ao longo do domínio que apresentam um valor do critério Q de 5000.

Figura 20 – Critério Q.



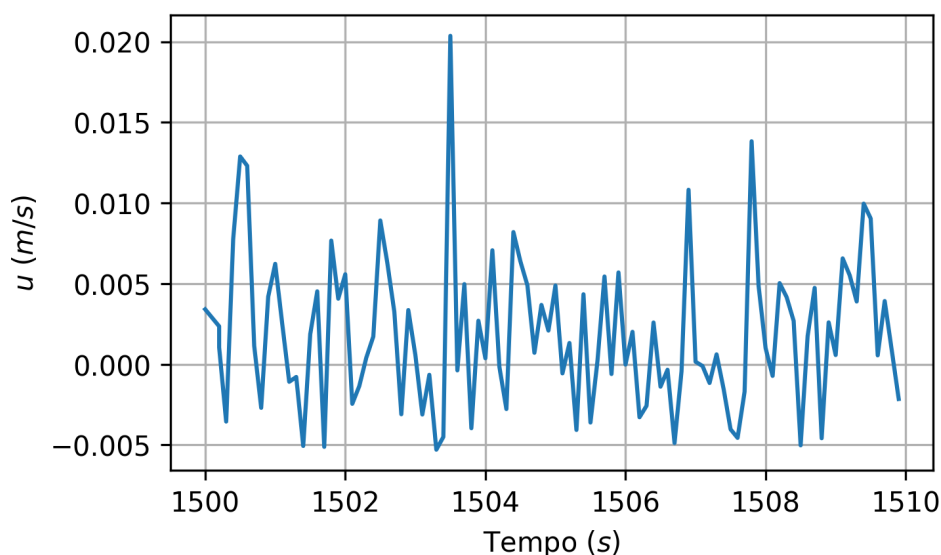
Fonte: Próprio Autor.

O valor 50000 foi definido por tentativa e erro, buscando um valor que pudesse representar a grande quantidade de estruturas turbilhonares que são formadas no escoamento estudado. Conforme o esperado, há uma maior densidade dessas estruturas na região abaixo da altura do obstáculo (a colina) e também logo acima das colinas, essa concentração pode ser associada, dentre outros fatores, ao descolamento da camada limite que ocorre após a colina.

### 6.6.6 Avaliação da variação de $u$ e $p$ ao longo do tempo de simulação

A variação da componente em  $x$  da velocidade do escoamento na posição onde  $x/H = 0,05$  e  $y/H = 1$  está apresentada no gráfico da Figura 21.

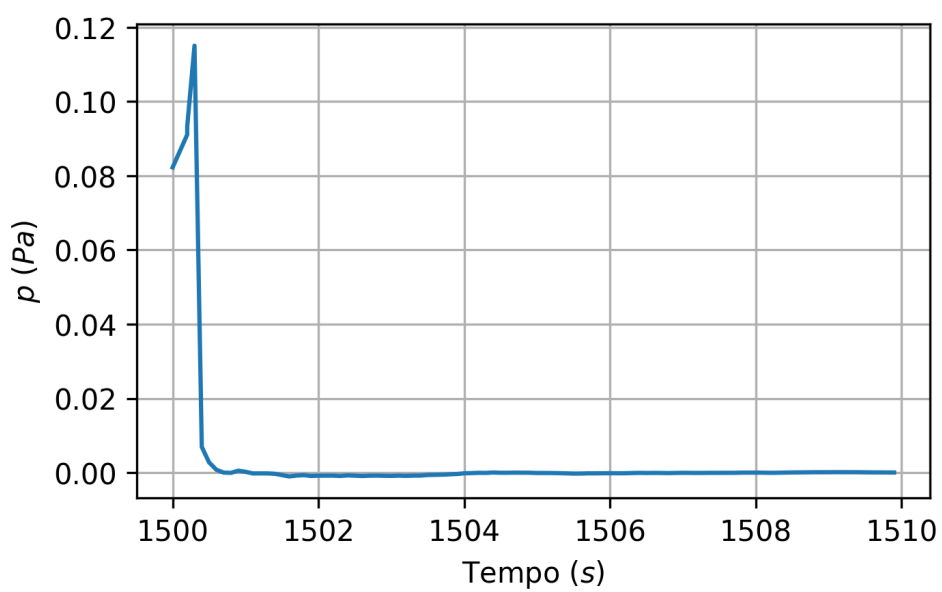
Figura 21 – Variação de  $u$  com o tempo.



Fonte: Próprio Autor.

A partir deste gráfico é um pouco difícil fazer análises sobre o escoamento visto que há uma alta variação durante todo o tempo sem sinal aparente de alguma forma de convergência ou periodicidade, embora este comportamento seja bem condizente com a alta turbulência observada na região em análise.

Entretanto é estabelecido um cenário diferente quando feita a análise da variação na pressão nesta mesma posição do escoamento, o gráfico a Figura 22 apresenta a variação de pressão nesta mesma posição, onde  $x/H = 0,05$  e  $y/H = 1$ . Neste gráfico é possível observar um sinal claro de convergência na medida que a pressão converge à zero, convergência a qual ocorre pouco após um segundo de simulação. Embora este sinal de convergência seja positivo, é interessante manter em mente que a análise completa da convergência do modelo utilizado deveria se basear em mais fatores, os quais não foram objeto de estudo do presente trabalho.

Figura 22 – Variação de  $p$  com o tempo.

Fonte: Próprio Autor.

## 7 Conclusão

Este trabalho realizou uma análise detalhada dos escoamentos turbulentos sobre colinas periódicas utilizando o software OpenFOAM<sup>®</sup>, focando na aplicação do modelo de turbulência Spalart-Allmaras e do método multigrid. Através de simulações numéricas, foi possível investigar o comportamento do escoamento sobre topografias complexas, identificando regiões de alta intensidade de turbulência e variações nos perfis de velocidade. Os resultados demonstraram a capacidade do OpenFOAM<sup>®</sup> de fornecer aspectos sobre a dinâmica dos escoamentos turbulentos, tornando-o uma ferramenta valiosa para a otimização da localização de turbinas eólicas na busca por um potencial eólico mais elevado.

O uso do modelo de turbulência Spalart-Allmaras mostrou-se adequado para capturar os principais fenômenos associados ao escoamento sobre colinas, fornecendo uma boa representação das estruturas turbulentas e das regiões de recirculação. A aplicação do método multigrid contribuiu para a eficiência computacional das simulações, permitindo a resolução de malhas finas e a obtenção de resultados precisos em um tempo razoável. A análise dos perfis de velocidade ao longo das colinas revelou importantes informações sobre a distribuição da velocidade e a formação de estruturas turbilhonares, que são elementos cruciais para o planejamento de instalações eólicas.

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações foram identificadas ao longo do estudo, sugerindo áreas de melhoria e futuros trabalhos. Uma análise de sensibilidade mais detalhada é necessária para avaliar como diferentes parâmetros de simulação, como a resolução da malha e os coeficientes do modelo de turbulência, influenciam os resultados.

Além disso, expandir o escopo do estudo para considerar outras formas de topografia e terrenos mais variados pode proporcionar uma visão mais abrangente sobre a aplicabilidade dos resultados em diferentes cenários. A implementação e comparação de outros modelos de turbulência, como os modelos  $k-\epsilon$  e  $k-\omega$ , bem como modelos de *Large Eddy Simulation* (LES), pode melhorar significativamente a precisão das simulações, capturando detalhes adicionais do comportamento do escoamento.

Incluir uma análise do impacto de diferentes condições climáticas nas simulações pode fornecer uma visão mais completa sobre a eficiência das turbinas eólicas em diversos cenários meteorológicos. Condições como variação de temperatura, umidade e velocidade do vento influenciam significativamente o desempenho das turbinas e devem ser consideradas para otimizar o planejamento e a operação das instalações eólicas.

Finalmente, a exploração da integração de técnicas de machine learning pode otimizar o processo de simulação e análise. Algoritmos de aprendizado de máquina

têm o potencial de identificar padrões complexos nos dados de simulação e prever o comportamento do escoamento em novas condições, aumentando a eficiência e a precisão das simulações.

Em resumo, este trabalho forneceu uma base sólida, abordando características metodológicas importantes e resultados condizentes para o estudo dos escoamentos turbulentos sobre colinas periódicas e o próprio uso do software OpenFOAM, além disso, destacou vários pontos para melhorias e futuros trabalhos. As sugestões apresentadas visam aprimorar a precisão, a aplicabilidade e a eficiência das simulações, contribuindo para um avanço significativo no campo da engenharia de fluidos e na otimização do uso de recursos renováveis.

## Referências

- ABBEEÓLICA. **ENERGIA EÓLICA: OS BONS VENTOS DO BRASIL**. 2024. Acessado em: 24 de junho de 2024. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/>>. Citado 3 vezes nas páginas 1, 2 e 3.
- AMARANTE, O. A. C. do et al. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, Brasil: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica/CEPEL, 2001. Disponível online. Citado na página 3.
- ANDERSON, J. D. **Fundamentals of Aerodynamics**. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2017. Citado na página 8.
- ANDRIULLI, R. et al. Implementation and validation of a numerical method for concentrated suspensions in large flows based on the particle diffusion equation. **Aerotecnica Missili & Spazio**, v. 103, n. 2, p. 165–178, February 2024. Citado na página 17.
- BREUER, M. et al. Flow over periodic hills – numerical and experimental study in a wide range of reynolds numbers. **Computers Fluids**, v. 38, p. 433–457, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 6, 21, 25 e 29.
- CASTRO, I. P.; PORTÉ-AGEL, F. Large-eddy simulation of wind turbine wake interactions with an atmospheric boundary layer: A case study. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 11, n. 1, p. 013101, 2019. Citado na página 4.
- CHAOUAT, B.; SCHIESTEL, R. Hybrid rans/les simulations of the turbulent flow over periodic hills at high reynolds number using the pitm method. **Computers & Fluids**, Elsevier, v. 84, p. 279–300, 2013. Citado na página 6.
- GRITSKEVICH, M. S. et al. Development of ddes and iddes formulations for the k- $\omega$  shear stress transport model. **Flow, Turbulence and Combustion**, Springer, v. 88, n. 4, p. 431–449, 2012. Citado na página 14.
- HUNT, J.; WRAY, A.; MOIN, P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. **Studying Turbulence Using Numerical Simulation Databases**, -1, p. 193–208, 11 1988. Citado na página 14.
- LEE, S. B. Numerical discrepancy between serial and mpi parallel computations. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, Elsevier, v. 8, p. 434–441, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 7, 22 e 24.
- MUNSON, B. R. et al. **Fundamentals of Fluid Mechanics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016. Citado na página 4.
- OPENCDFD. **Periodic hill**. 2018. Acessado em: 26 de junho de 2024. Disponível em: <<https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/verification-validation-turbulent-periodic-hill.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 20.
- OPENCDFD. **About**. 2024. Acessado em: 26 de junho de 2024. Disponível em: <<https://doc.openfoam.com/2312/fundamentals/about/>>. Citado na página 16.

OPENCFO. **Backward time scheme**. 2024. Acessado em: 26 de junho de 2024. Disponível em: <<https://doc.openfoam.com/2312/tools/processing/numerics/schemes/time/rtm/backward/>>. Citado na página 19.

OPENCFO. **Spalart-Allmaras Detached Eddy Simulation (DES)**. 2024. Acessado em: 26 de junho de 2024. Disponível em: <<https://doc.openfoam.com/2312/tools/processing/models/turbulence/des/rtm/SpalartAllmarasDES/#model-equations>>. Citado na página 23.

OPENCFO. **Spalart-Allmaras Improved Delayed Detached Eddy Simulation (IDDES)**. 2024. Acessado em: 26 de junho de 2024. Disponível em: <<https://doc.openfoam.com/2312/tools/processing/models/turbulence/des/rtm/SpalartAllmarasIDDES/#model-equations>>. Citado na página 14.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. [S.l.]: Hemisphere Publishing Corporation (CRC Press, Taylor Francis Group), 1980. ISBN 978-0891165224. Citado na página 19.

PEQUENO, A. **Camada Limite – Projeto e Otimização**. 2020. Acessado em: 08 de julho de 2024. Disponível em: <<https://engenhariaaeronautica.com.br/curiosidades-engenharia-aeronautica/camada-limite-projeto-e-otimizacao/>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.

POPE, S. B. **Turbulent Flows**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 978-0521598866. Citado 4 vezes nas páginas 4, 9, 13 e 32.

PRANDTL, L. Über flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner reibung. In: **Verhandlungen des III. Internationalen Mathematiker-Kongresses**. [S.l.: s.n.], 1904. Citado na página 7.

SANTOS, B. L. **Simulações computacionais de escoamentos sobre terrenos planos utilizando o OpenFoam**. 2022. Projeto Final de Curso - Universidade Federal de Goiás. Citado na página 6.

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. **Boundary-Layer Theory**. [S.l.]: Springer, 2017. Citado na página 8.

SHIH, T.-H. et al. A new  $k-\varepsilon$  eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. **Computers & Fluids**, v. 24, n. 3, p. 227–238, 1995. Citado na página 4.

SHUR, M. L. et al. A hybrid rans-les approach with delayed-des and wall-modelled les capabilities. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 29, n. 6, p. 1638–1649, 2008. Citado na página 13.

SPALART, P. R. Detached-eddy simulation. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 41, p. 181–202, 2009. Citado na página 13.

SPALART, P. R.; ALLMARAS, S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. **La Recherche Aeronautique**, v. 1, p. 5–21, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 23.

TELUB. **TURBINAS EÓLICAS**. 2022. Acessado em: 08 de julho de 2024. Disponível em: <<https://www.telub.com.br/blog/artigos-tecnicos/turbinas-eolicas>>. Citado na página 3.

WESSELING, P.; OOSTERLEE, C. Geometric multigrid with applications to computational fluid dynamics. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, Elsevier, v. 128, p. 311–334, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

WHITE, F. M. **Viscous Fluid Flow**. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2021. Citado na página 8.

XIAO, H. et al. Flows over periodic hills of parameterized geometries: A dataset for data-driven turbulence modeling from direct simulations. **Computers and Fluids**, v. 200, 2020. Citado na página 6.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. [S.l.]: Tradução de Katia Aparecida Roque e Mario Moro fecchio. 3<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

## **Apêndices**

## APÊNDICE A – Arquivo *blockMeshDict*

```

/*-----*- C++ -*-----*/
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
/*-----*- C++ -*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       blockMeshDict;
}
// * * * * * //

scale 0.001;

vertices
(
    ( 0 28 0) // 0
    (252 28 0) // 1
    (252 85 0) // 2
    ( 0 85 0) // 3

    ( 0 28 126) // 4
    (252 28 126) // 5
    (252 85 126) // 6
    ( 0 85 126) // 7
);

blocks
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (200 160 80) simpleGrading (1 ((0.5 0.5 100)(0.5 0.5 0.01
);

```

```
edges #codeStream
{
    codeInclude
    #{
        #include "pointField.H"
        #include "mathematicalConstants.H"
    #};

    code
    #{
        const scalar xMin = 0;
        const scalar xMax = 252;
        const label nPoints = 1000;
        const scalar dx = (xMax - xMin)/scalar(nPoints - 1);

        os << "(" << nl << "spline 0 1" << nl;
        pointField profile(nPoints, Zero);

        for (label i = 0; i < nPoints; ++i)
        {
            scalar x = xMin + i*dx;
            profile[i].x() = x;
            if (x > 198) x = 252 - x;

            if (x >= 0 && x < 9)
            {
                profile[i].y() =
                    28
                    + 6.775070969851E-03*x*x
                    - 2.124527775800E-03*x*x*x;
            }
            else if (x >= 9 && x < 14)
            {
                profile[i].y() =
                    25.07355893131
                    + 0.9754803562315*x
                    - 1.016116352781E-01*x*x
                    + 1.889794677828E-03*x*x*x;
            }
        }
    }
}
```

```
else if (x >= 14 && x < 20)
{
    profile[i].y() =
        2.579601052357E+01
        + 8.206693007457E-01*x
        - 9.055370274339E-02*x*x
        + 1.626510569859E-03*x*x*x;
}
else if (x >= 20 && x < 30)
{
    profile[i].y() =
        4.046435022819E+01
        - 1.379581654948E+00*x
        + 1.945884504128E-02*x*x
        - 2.070318932190E-04*x*x*x;
}
else if (x >= 30 && x < 40)
{
    profile[i].y() =
        1.792461334664E+01
        + 8.743920332081E-01*x
        - 5.567361123058E-02*x*x
        + 6.277731764683E-04*x*x*x;
}
else if (x >= 40 && x < 54)
{
    profile[i].y() =
        max
        (
            0,
            5.639011190988E+01
            - 2.010520359035E+00*x
            + 1.644919857549E-02*x*x
            + 2.674976141766E-05*x*x*x
        );
}
profile[i].z() = 0;
}
os << profile << nl;
```

```
    os << "spline 4 5" << nl;
    profile.replace(2, 126);
    os << profile << nl;

    os << ");" << nl;
};
};

boundary
(
    inlet
    {
        type            cyclic;
        neighbourPatch  outlet;
        faces
        (
            (0 4 7 3)
        );
    }
    outlet
    {
        type            cyclic;
        neighbourPatch  inlet;
        faces
        (
            (1 2 6 5)
        );
    }
    top
    {
        type            wall;
        faces
        (
            (3 7 6 2)
        );
    }
    hills
    {
```

```
        type            wall;
        faces
        (
            (1 5 4 0)
        );
    }
    front
    {
        type            cyclic;
        neighbourPatch  back;
        faces
        (
            (0 3 2 1)
        );
    }
    back
    {
        type            cyclic;
        neighbourPatch  front;
        faces
        (
            (4 5 6 7)
        );
    }
);
```

```
// ***** //
```

## APÊNDICE B – Arquivo *controlDict* - Regime Permanente

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*-*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       controlDict;
}
// * * * * * //

application     simpleFoam;

startFrom       startTime;

startTime       0;

stopAt          endTime;

endTime         1500;

deltaT          1;

writeControl    timeStep;

writeInterval   100;

purgeWrite      3;

writeFormat     binary;

```

writePrecision 6;

writeCompression off;

timeFormat general;

timePrecision 6;

runTimeModifiable true;

// \*\*\*\*\* //

## APÊNDICE C – Arquivo *fvSolution*

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
|-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSolution;
}
// * * * * * //

solvers
{
    p
    {
        solver      GAMG;
        smoother    DICGaussSeidel;
        tolerance   1e-06;
        relTol      0.05;
    }

    "(U|k|nuTilda)"
    {
        solver      PBiCG;
        preconditioner DILU;
        tolerance   1e-05;
        relTol      0.1;
    }
}

SIMPLE

```

```
{
  nNonOrthogonalCorrectors 0;
  consistent      yes;
  pRefCell       0;
  pRefValue      0;
}
```

```
relaxationFactors
```

```
{
  equations
  {
    U      0.9;
    nuTilda 0.7;
  }
}
```

```
// ***** //
```

## APÊNDICE D – Arquivo *k* - Regime Permanente

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       k;
}
// *****

dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    "(inlet|outlet|front|back)"
    {
        type      cyclic;
    }

    "(top|hills)"
    {
        type      zeroGradient;
    }
}

// *****

```

## APÊNDICE E – Arquivo *nut* - Regime Permanente

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*-
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       nut;
}
// *****

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    "(inlet|outlet|front|back)"
    {
        type      cyclic;
    }

    "(top|hills)"
    {
        type      nutUSpaldingWallFunction;
        value     $internalField;
    }
}

// *****

```

## APÊNDICE F – Arquivo *nuTilda* - Regime Permanente

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*-
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       nuTilda;
}
// * * * * *

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform 1e-8;

boundaryField
{
    "(inlet|outlet|front|back)"
    {
        type      cyclic;
    }

    "(top|hills)"
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 0;
    }
}

// * * * * *

```

## APÊNDICE G – Arquivo *p* - Regime Permanente

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*-
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       p;
}
// *****

dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    "(inlet|outlet|front|back)"
    {
        type      cyclic;
    }

    "(top|hills)"
    {
        type      zeroGradient;
    }
}

// *****

```

## APÊNDICE H – Arquivo *U* - Regime Permanente

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    object       U;
}
// *****

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform (1e-3 0 0);

boundaryField
{
    "(inlet|outlet|front|back)"
    {
        type      cyclic;
    }

    "(top|hills)"
    {
        type      noSlip;
    }
}

// *****

```

## APÊNDICE I – Arquivo *turbulenceProperties* - Regime Permanente

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*- C++ -*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       turbulenceProperties;
}

// *****

simulationType      RAS;

RAS
{
    RASModel          SpalartAllmaras;

    printCoeffs       no;

    turbulence         yes;
}

// *****

```

## APÊNDICE J – Arquivo *transportProperties*

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       transportProperties;
}
// ***** //

transportModel Newtonian;

nu              2.643e-6;

// ***** //

```



## APÊNDICE L – Arquivo *fvSchemes* - Regime Transiente

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// * * * * *

ddtSchemes
{
    default      backward;
}

gradSchemes
{
    default      Gauss linear;
    grad(p)      Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default      none;

    div(phi,U)   Gauss DEShybrid
        linear                    // scheme 1
        linearUpwind grad(U)      // scheme 2
        hmax
        0.65                       // DES coefficient, typically = 0.65
}

```

```
1 // Reference velocity scale
0.028 // Reference length scale
0 // Minimum sigma limit (0-1)
1 // Maximum sigma limit (0-1)
1; // 1.0e-03; // Limiter of B function, typically 1e-03

div(phi,k) Gauss limitedLinear 1;
div(phi,nuTilda) Gauss limitedLinear 1;

div((nuEff*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
}

laplacianSchemes
{
    default Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default linear;
}

snGradSchemes
{
    default corrected;
}

wallDist
{
    method meshWave;
    nRequired yes;
}

// ***** //
```

## APÊNDICE M – Arquivo *turbulenceProperties* - Regime Transiente

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*-*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       turbulenceProperties;
}

// * * * * *

simulationType    LES;

LES
{
    LESModel       SpalartAllmarasIDDES;

    printCoeffs    no;

    turbulence     yes;

    delta          IDDESDelta;

    IDDESDeltaCoeffs
    {
        hmax       maxDeltaxyzCubeRoot;
        maxDeltaxyzCubeRootCoeffs
        {
        }
    }
}
}

```

// \*\*\*\*\* //

## APÊNDICE N – Arquivo *controlDict* - Regime Transiente

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2312 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       turbulenceProperties;
}
// * * * * * //

simulationType    LES;

LES
{
    LESModel        SpalartAllmarasIDDES;

    printCoeffs     no;

    turbulence       yes;

    delta            IDDESDelta;

    IDDESDeltaCoeffs
    {
        hmax          maxDeltaxyzCubeRoot;
        maxDeltaxyzCubeRootCoeffs
        {
        }
    }
}
}

```

// \*\*\*\*\* //