

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

**ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO DE UM TERRENO COMPLEXO EMPREGANDO
MODELAGEM NUMÉRICA DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA VIA OPENFOAM**

por

Gabriel Barbieri Dumont

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

Porto Alegre, julho de 2019



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

ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO DE UM TERRENO COMPLEXO EMPREGANDO
MODELAGEM NUMÉRICA DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA VIA OPENFOAM

por

Gabriel Barbieri Dumont

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Letícia Jenisch Rodrigues
Coordenadora do Curso de Engenharia de Energia

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

Coorientador: Me. William Corrêa Radünz

Porto Alegre, 6 de julho de 2019

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por sempre incentivarem minha curiosidade e senso crítico, por me apoiarem incondicionalmente em todas as etapas da minha vida e por serem minhas referências de integridade e ética. Em particular à minha mãe, por ser a minha principal janela ao mundo acadêmico e um exemplo de resiliência e competência.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Adriane Prisco Petry, pela oportunidade de trabalhar com algo que sempre foi minha paixão, por compartilhar seu amplo conhecimento, pelo constante incentivo e por acreditar no meu potencial.

Aos meus amigos e namorado, pois o afeto de vocês tornou esses árduos anos de estudo os melhores da minha vida.

Ao Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha, por me conceder a minha primeira bolsa de iniciação científica, e, portanto, minhas primeiras oportunidades no meio acadêmico.

Ao meu coorientador, William Corrêa Radünz, e a Yuri Theodoro, por disponibilizarem seu tempo e esforço para me ajudar com as exigências das minhas bolsas de pesquisa.

À UFRGS e seus professores e demais servidores, pelo seu papel na manutenção dessa instituição responsável por difundir o conhecimento e abrir diversas portas para mim e tantos outros.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro em minhas bolsas de pesquisa.

Aos desenvolvedores de *softwares* livres, por tornarem esse trabalho viável e acreditarem em um futuro em que o acesso ao conhecimento é um direito de todos.

A (TAYLOR e TEUNISSEN, 1987), por disponibilizarem os dados do projeto de Askervein.

A todos os cientistas, artistas e ativistas que dedicam seu trabalho para tornar a condição humana mais digna, principalmente em tempos de obscurantismo.

DUMONT, G. B. **Análise do Potencial Eólico de um Terreno Complexo Empregando Modelagem Numérica da Camada Limite Atmosférica via OpenFOAM**. 2019. 40 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

O trabalho consiste no uso de um pacote de fluidodinâmica computacional de código aberto, o OpenFOAM, para desenvolver um modelo capaz de simular escoamentos de camada limite atmosférica em regiões de topografia complexa, a fim de realizar avaliações de potencial eólico. A consistência do modelo é verificada em uma simulação bidimensional em um terreno uniforme, onde o perfil da camada superficial atmosférica deve se manter constante, por meio de modificações nas funções de parede e constantes do modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão. Após a verificação, o modelo é validado através de simulações em domínios computacionais que representam Askervein, uma colina real onde foram efetuadas campanhas de medição na Escócia. No estudo de caso, o modelo é aplicado a uma região de interesse no município de Herval, RS, para realizar um mapeamento da velocidade do vento, permitindo a análise do posicionamento dos aerogeradores na região, visando maximizar a energia anual gerada. Os resultados das simulações indicam que a presença do relevo complexo causa uma mudança de mais de 20% na velocidade média prevista em certos locais, assim como variações de até 30% na energia anual gerada para um mesmo modelo de aerogerador situado em diferentes regiões do terreno.

PALAVRAS-CHAVE: Energia eólica, Camada limite atmosférica, OpenFOAM, Terrenos complexos.

DUMONT, G. B. **Wind Resource Assessment of a Complex Terrain Using an Atmospheric Boundary Layer Model Developed in OpenFOAM**. 2019. 40 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

This work is based on developing a model to simulate atmospheric boundary layer flows over complex terrains, using the CFD toolbox OpenFOAM, and applying said model to conduct the wind resource assessment of a real terrain. The model's consistency is assured through a simulation in a bidimensional plain terrain with uniform rugosity, where the atmospheric surface layer profile should remain unchanged; this is achieved by modifying the standard wall functions and altering the constants of the standard $k-\varepsilon$ turbulence model. After verification, the model is validated by being applied to computational domains that represent Askervein Hill, a real location in Scotland where several wind measurement campaigns were undertaken. For the case study, a geometry that represents a region of interest in the Herval, RS municipality is procured and the model is used to obtain a wind velocity map, which is used to maximize the annual generated energy by selecting the optimal positioning for the wind turbines. The results indicate that the presence of complex topography causes changes of over 20% in the mean wind speed of certain areas, as well as variations of up to 30% in the annual generated energy for the same wind turbine model when placed in different areas of the region.

KEYWORDS: Wind power, Atmospheric boundary layer, OpenFOAM, Complex terrains.

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 3 |
| 2.1 | O Vento | 3 |
| 2.2 | Definição de Camada Limite Atmosférica | 3 |
| 2.3 | Estrutura da Camada Limite Atmosférica | 3 |
| 2.4 | Estabilidade e Estratificação da Camada Limite Atmosférica | 4 |
| 2.5 | Equações Governantes..... | 6 |
| 2.6 | Turbulência..... | 6 |
| 2.7 | Conversão de Energia Eólica..... | 8 |
| 3 | METODOLOGIA E MODELAGEM | 10 |
| 3.1 | Hipóteses Simplificativas do Modelo..... | 10 |
| 3.2 | Seleção da Região de Interesse..... | 10 |
| 3.3 | Pré-Processamento | 11 |
| 3.3.1 | Geração dos Domínios Computacionais..... | 11 |
| 3.3.2 | Condições de Contorno | 13 |
| 3.3.3 | Esquemas de Discretização | 14 |
| 3.3.4 | Demais Configurações..... | 16 |
| 3.4 | Pós-Processamento | 16 |
| 4 | SIMULAÇÕES E RESULTADOS | 17 |
| 4.1 | Verificação do Modelo | 17 |
| 4.2 | Validação do Modelo | 17 |
| 4.2.1 | Campanhas de Medição..... | 18 |
| 4.2.2 | Parâmetros de Validação | 18 |
| 4.2.3 | Constantes do Modelo de Turbulência | 19 |
| 4.2.4 | Análise dos Resultados..... | 19 |
| 4.3 | Estudo de Caso | 21 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 23 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 24 |
| | APÊNDICE A - Estrutura de uma Simulação no OpenFOAM..... | 26 |
| | APÊNDICE B - Dados das Simulações de Askervein..... | 27 |
| | APÊNDICE C - Parâmetros dos Aerogeradores..... | 28 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------------|---|----|
| FIGURA 2.1a | Estrutura padrão da CLA [Retirado de (SCHUBERT e ELETROSUL, 2014)]..... | 4 |
| FIGURA 2.1b | Efeito da rugosidade aerodinâmica no cisalhamento do vento [Retirado de (RADÜNZ, 2018)]..... | 4 |
| FIGURA 2.2 | Influência da estabilidade atmosférica em um terreno complexo [Adaptado de (CAFIRESCHI, 2019)]..... | 5 |
| FIGURA 2.3 | Cascata de energia [Autor]..... | 7 |
| FIGURA 2.4 | Tubo de corrente [Retirado de (BURTON, 2011)]..... | 8 |
| FIGURA 2.5 | Curva de potência de um aerogerador real [Autor]..... | 9 |
| FIGURA 3.1 | Seleção da região de interesse no Atlas Eólico [Adaptado de (SCHUBERT e ELETROSUL, 2014)]..... | 11 |
| FIGURA 3.2a | Recorte da região de interesse no MDE [Autor]..... | 12 |
| FIGURA 3.2b | Mapa de altitude da região de interesse gerado no <i>Paraview</i> [Autor]..... | 12 |
| FIGURA 3.3a | Processo para converter o MDE em .stl [Adaptada de (HARDIN, 2013)]..... | 12 |
| FIGURA 3.3b | Resultado da conversão em .stl para a região de interesse [Autor]..... | 12 |
| FIGURA 3.4 | Domínio computacional representando a região de interesse [Autor]..... | 13 |
| FIGURA 4.1 | Perfis de U e k ao longo do terreno plano e uniforme [Autor]..... | 17 |
| FIGURA 4.2 | Foto de Askervein e sua representação no domínio computacional [Retirado de (TAYLOR e TEUNISSEN, 1987), Autor]..... | 18 |
| FIGURA 4.3 | Perfis de entrada para as simulações de Askervein [Autor]..... | 19 |
| FIGURA 4.4 | RV e RECT a 10 m de altura ao longo do domínio computacional de Askervein [Autor]. | 20 |
| FIGURA 4.5 | Perfis de RV e RECT no topo da colina [Autor]..... | 20 |
| FIGURA 4.6a | Mapa de \bar{U} [m/s] da região de interesse a 100 m de altura [Autor]..... | 21 |
| FIGURA 4.6b | Mapa de k [m ² /s ²] da região de interesse a 100 m de altura [Autor]..... | 21 |
| FIGURA 4.7 | Mapa de densidade de potência [W/m ²] da região de interesse a 100 m [Autor]..... | 22 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| TABELA 3.1 | Parâmetros das geometrias analisadas..... | 13 |
| TABELA 3.2 | Esquemas de discretização do arquivo <i>fvSchemes</i> | 15 |
| TABELA 4.1 | Parâmetros de entrada para as simulações de Askervein..... | 19 |
| TABELA 4.2 | Valores de TA e ER para RV e RECT com o modelo Atmosférico para Askervein..... | 20 |
| TABELA 4.3 | Parâmetros das simulações realizadas no terreno de interesse..... | 21 |
| TABELA 4.4 | Parâmetros dos aerogeradores alocados..... | 22 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-----------------|--|
| CFD | Fluidodinâmica Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>) |
| CLA | Camada Limite Atmosférica |
| CLS | Camada Limite Superficial |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| FVM | Método dos Volumes Finitos (<i>Finite Volume Method</i>) |
| GAMG | <i>Generalised Geometric-Algebraic Multi-Grid</i> |
| GRASS GIS | <i>Geographic Resources Analysis Support System</i> |
| LT | Linha de Transmissão de Energia Elétrica |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| OpenFOAM | <i>Open source Field Operation and Manipulation</i> |
| OSGeo | <i>Open Source Geospatial Foundation</i> |
| PBiCG | <i>Preconditioned Bi-Conjugate Gradient</i> |
| PCG | <i>Preconditioned Conjugate Gradient</i> |
| QUICK | <i>Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics</i> |
| RANS | <i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i> |
| RECT | Razão de Energia Cinética Turbulenta Incremental |
| RS | Rio Grande do Sul, Brasil |
| RV | Razão de Velocidade Incremental |
| SIG / GIS | Sistemas de Informação Geográficos / <i>Geographic Information Systems</i> |
| SIMPLE | <i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i> |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| SRTM | <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> |
| USGS | <i>United States Geological Survey</i> |
| UTM | Universal Transversa de Mercator |
| WAsP | <i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

| | |
|---------------------|---|
| A | Área varrida pelas pás do rotor [m ²] |
| c_p | Calor específico [J/kgK] |
| C | Parâmetro de escala da distribuição de Weibull [m/s] |
| $C_{\varepsilon 1}$ | Constante do modelo k - ε [adimensional] |
| $C_{\varepsilon 2}$ | Constante do modelo k - ε [adimensional] |
| C_μ | Constante do modelo k - ε [adimensional] |
| D | Diâmetro da área varrida pelas pás do rotor [m] |
| EAG | Energia anual gerada [MWh] |
| ER | Erro relativo [%] |
| ER_{RECT} | Erro relativo médio da RECT na simulação [%] |
| ER_{RV} | Erro relativo médio da RV na simulação [%] |
| $ER_{RECT,MAX}$ | Erro relativo máximo da RECT na simulação [%] |
| $ER_{RV,MAX}$ | Erro relativo máximo da RV na simulação [%] |
| f | Frequência de ocorrência de uma dada velocidade [%] |
| g | Aceleração gravitacional da Terra [m/s ²] |
| k | Energia cinética turbulenta [m ² /s ²] |
| k_{ref} | Energia cinética turbulência do perfil de entrada [m ² /s ²] |
| L | Escala de comprimento característica do terreno [m] |
| N_{iter} | Número de iterações até a convergência de uma simulação [adimensional] |
| p | Pressão instantânea [Pa] |
| \bar{p} | Pressão modificada [Pa] |
| p_o | Pressão de referência [Pa] |
| P | Potência elétrica desenvolvida pelo aerogerador [W] |
| P_k | Produção de energia cinética turbulenta por cisalhamento [W/m ³] |
| R | Constante dos gases ideais para o ar [J/kgK] |

| | |
|-------------|---|
| Re | Número de Reynolds [adimensional] |
| Ro | Número de Rossby [adimensional] |
| S_M | Termo fonte da equação do transporte de quantidade de movimento [N/m ³] |
| S_ϕ | Termo fonte da equação do transporte de ϕ [unidade variável] |
| t | Tempo [s] |
| t_{iter} | Tempo médio requerido por cada iteração de uma simulação [s] |
| t_{simu} | Tempo decorrido até a convergência de uma simulação [h] |
| T | Temperatura da parcela de ar [K] |
| TA | Taxa de acerto [%] |
| TA_{RECT} | Taxa de acerto da RECT na simulação [%] |
| TA_{RV} | Taxa de acerto da RV na simulação [%] |
| u | Velocidade instantânea do vento [m/s] |
| \bar{u} | Velocidade média de curto-prazo [m/s] |
| u' | Flutuação de velocidade [m/s] |
| u_* | Velocidade de fricção [m/s] |
| U | Velocidade média de longo-prazo [m/s] |
| U_{ref} | Velocidade média de longo-prazo do perfil de entrada na mesma altura [m/s] |
| \bar{U} | Velocidade média da distribuição de Weibull [m/s] |
| X | Coordenada UTM dos aerogeradores [m] |
| Y | Coordenada UTM dos aerogeradores [m] |
| z | Altura [m] |
| z_o | Comprimento de rugosidade aerodinâmica da superfície [m] |
| Z_{BASE} | Altura da base do aerogerador em relação ao nível do mar [m] |
| Z_{HUB} | Altura do eixo do aerogerador em relação ao nível do mar [m] |
| Z_w | Altura das primeiras células acima da superfície no domínio computacional [m] |

Símbolos Gregos

| | |
|------------|--|
| α | Parâmetro de forma da distribuição de Weibull [adimensional] |
| α_C | Aceleração relativa de Coriolis [m/s ²] |

| | |
|----------------------|---|
| Γ | Função gama [adimensional] |
| Γ_a | Taxa de resfriamento adiabática [K/m] |
| ε | Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta [m ² /s ³] |
| θ | Temperatura potencial da parcela de ar [K] |
| η_e | Eficiência elétrica do aerogerador [adimensional] |
| η_m | Eficiência mecânica do aerogerador [adimensional] |
| κ | Constante de Von Kármán [adimensional] |
| μ | Viscosidade dinâmica [N s/m] |
| μ_t | Viscosidade dinâmica turbulenta [N s/m] |
| ν_t | Viscosidade cinemática turbulenta [m ² /s] |
| ξ | Coeficiente de difusão da equação de transporte de ϕ [unidade variável] |
| ρ | Massa específica [kg/m ³] |
| σ_k | Número de Prandtl de k [adimensional] |
| σ_ε | Número de Prandtl de ε [adimensional] |
| τ_w | Tensão de cisalhamento na superfície [Pa] |
| φ | Latitude do local [°] |
| ϕ | Campo genérico [unidade variável] |
| ϕ_c | Valor de ϕ no ponto central da célula analisada [unidade variável] |
| ϕ_{c-1} | Valor de ϕ no ponto central da célula anterior à analisada [unidade variável] |
| ϕ_{c-2} | Valor de ϕ no ponto central da célula anterior à ϕ_{c-1} [unidade variável] |
| ϕ_{exp} | Valor de ϕ medido experimentalmente [unidade variável] |
| ϕ_f | Valor de ϕ na face da célula analisada [unidade variável] |
| ϕ_{simu} | Valor de ϕ obtido através da simulação numérica [unidade variável] |
| Ω | Velocidade angular da Terra [rad/s] |

1 INTRODUÇÃO

O estudo das propriedades dinâmicas da camada limite atmosférica é fundamental para várias aplicações, tanto em engenharia como em ciências atmosféricas e ambientais. Aplicações clássicas na área das ciências atmosféricas e ambientais são a modelagem da dispersão de poluentes, climas urbanos, incêndios florestais, evapotranspiração e a micrometeorologia. Para a engenharia convencional, destacam-se os estudos de aerodinâmica de construções e veículos, climatização, e, em particular, a avaliação de potencial eólico de uma região (KOBELITZ *et al.*, 2013).

A energia eólica tem ganhado destaque no cenário internacional, por tratar-se de uma fonte de energia renovável e de baixo impacto ambiental em relação às outras fontes energéticas. A redução da produção de gases de efeito estufa, como o CO₂, tornou-se uma pauta prioritária entre os pesquisadores e promotores de políticas públicas de todo o mundo, devido a fortes evidências que essas emissões são as principais responsáveis pelo aumento da concentração desses gases na atmosfera e, portanto, por um processo de mudança climática que está associado a uma maior incidência de desastres naturais e à variação de regimes hidrológicos e climatológicos (DE CONINCK, 2018). Assim, a energia eólica, por utilizar recursos inesgotáveis e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, torna-se atraente.

De forma geral, devido a essas preocupações e a subsídios, as energias renováveis apresentam a maior previsão de crescimento no setor de energia elétrica, em torno de 70% até 2023, representando um total de 30% da produção de energia elétrica (IEA, 2018). O crescimento da energia eólica é o segundo maior nesse período, ficando atrás apenas da fonte solar fotovoltaica, que possui atualmente uma potência instalada muito inferior. No Brasil, em 2019, a energia eólica passou a ocupar o posto de segunda principal fonte de energia elétrica, após a hidrelétrica (ABEEÓLICA, 2019).

Como a potência elétrica convertida pelos aerogeradores é proporcional ao cubo da velocidade do vento, incertezas associadas às avaliações preliminares de potencial eólico são amplificadas na estimativa da capacidade de produção de energia elétrica de um parque eólico, sendo necessário diminuí-las o máximo possível a fim de tornar o investimento atraente. Como não é possível, devido a restrições técnicas e financeiras, alocar estações meteorológicas em número suficiente para obter dados de vento ao longo de toda a região de um parque eólico, são adotados métodos para simular o vento local com auxílio dos dados meteorológicos fornecidos pelas torres instaladas, como experimentos em túneis de vento e simulações computacionais empregando modelos numéricos. Esses modelos numéricos variam desde modelos lineares, como o WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*), baseado em (JACKSON e HUNT, 1975), a modelos que utilizam CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

De acordo com Zhang (2015), a orografia de uma região, para fins de estudo dos ventos, pode ser classificada em função da probabilidade de ocorrer separação do escoamento. Para atmosferas neutras, é aceito que uma inclinação acima de 22° no barlavento e/ou 17° no sotavento é suficiente para causar separação, e, como a direção do vento varia na natureza, valores de inclinação superiores a 17° definem terrenos complexos. Nesses terrenos, diferentes fenômenos geofísicos ocorrem em função da presença da topografia, como o aparecimento de uma componente vertical de velocidade do vento e o efeito de velocidade incremental do vento no sentido ascendente, além da possibilidade de descolamento da camada limite e surgimento de regiões de recirculação do escoamento (MATTUELLA, 2012). Esses fenômenos representam comportamentos não-lineares dos escoamentos de camada limite atmosférica, e uma metodologia capaz de simulá-los é de interesse para todas as escalas de aproveitamentos eólicos, pois os efeitos da turbulência atmosférica se fazem presentes desde escalas na ordem de centímetros até escalas na ordem de quilômetros, porém é ainda mais vital para aplicações de microgeração, que são mais sensíveis à turbulência gerada pela topografia e obstáculos (ESTANQUEIRO e SIMÕES, 2016).

Embora demonstrem um desempenho adequado em terrenos planos, os modelos numéricos lineares falham em topografias complexas, tornando necessárias outras abordagens. Strataridakis, White e Greis (1998) realizaram medições de velocidade média e turbulência utilizando um modelo em escala em túnel de vento, e concluíram que as medições de turbulência em túnel de vento eram capazes de indicar as posições mais favoráveis para a locação de turbinas eólicas em um terreno. De forma geral, experimentos em túnel de vento tem oferecido bons resultados na identificação de certos fenômenos não-lineares dos escoamentos de camada limite atmosférica, porém não eliminam incertezas quanto a outros, como o comportamento da velocidade vertical do vento (MATTUELLA, 2012). Outra abordagem envolve o uso

de modelos numéricos de CFD, que são capazes de reproduzir comportamentos não-lineares. No entanto, o custo computacional da resolução de todas as escalas das equações de Navier-Stokes é proibitivo, levando ao uso de modelos de turbulência baseados nas Equações de Navier-Stokes com Médias de Reynolds (RANS). O modelo de turbulência mais utilizado em simulações de camada limite atmosférica é o modelo $k-\epsilon$ (LAUNDER e SPALDING, 1974), empregado neste estudo.

Os modelos CFD geralmente simulam a camada limite atmosférica em seu estado neutro, ou seja, a geração de turbulência por forças de empuxo é desconsiderada. Além disso, pressupõem-se condições de equilíbrio na entrada do domínio computacional, que são satisfeitas pelos perfis de entrada completamente desenvolvidos apresentados por (RICHARDS e HOXEY, 1993), que são consistentes com o modelo de turbulência $k-\epsilon$. No entanto, embora sejam completamente desenvolvidos, esses perfis estão sujeitos a alterações caso haja uma inconsistência entre eles e a função de parede empregada. Essa questão foi resolvida por (BALOGH *et al.*, 2012), que desenvolveu funções de parede adequadas para escoamentos de camada limite atmosférica, consistentes com os perfis de entrada definidos por (RICHARDS e HOXEY, 1993).

O presente trabalho consiste no uso do pacote OpenFOAM para realizar avaliações de potencial eólico em terrenos complexos, através do desenvolvimento de um modelo para escoamentos de camada limite atmosférica. O modelo é testado e validado através de simulações em domínios computacionais que representam a colina de Askervein, na Escócia, que foi escolhida por possuir dados meteorológicos disponíveis e extensamente documentados na literatura (AZEVEDO *et al.*, 2013). O objetivo deste estudo é verificar a consistência do modelo numérico empregado e então aplicá-lo para realizar uma análise de potencial eólico em uma região de interesse no município de Herval, RS, cujo produto final é um *mapa de velocidades*, que oferece valores de velocidade média para cada ponto do domínio computacional. Esses dados viabilizam uma proposta de *micrositing* para a área, ou seja, o projeto de posicionamento das turbinas para otimizar a produção de energia do parque eólico, o que também implica na escolha do modelo de aerogerador mais adequado para o parque.

O OpenFOAM é um pacote de ferramentas em linguagem C++ voltado para o desenvolvimento de *solvers* numéricos para problemas de mecânica do contínuo, e possui em seu código fonte funcionalidades para a solução das equações RANS com diversos modelos de turbulência. Ele se destaca por ser de código aberto, tornando os projetos mais economicamente viáveis e permitindo a alteração de seu código fonte, e, portanto, a possibilidade de uma melhor adaptação às necessidades particulares dos escoamentos da camada limite atmosférica. Por exemplo, neste estudo foi possível editar o código fonte para realizar alterações à função de parede padrão do modelo, a fim de adequá-la para escoamentos de camada limite atmosférica, utilizando a formulação apresentada por (BALOGH *et al.*, 2012).

O modelo computacional é validado primeiro em uma simulação bidimensional em um terreno plano com rugosidade uniforme, onde verifica-se que os perfis da camada superficial atmosférica se mantêm constantes, e, na sequência, é aplicado aos domínios computacionais que representam Askervein. São testados diferentes níveis de refinamento do domínio computacional, assim como diferentes esquemas de discretização e constantes do modelo $k-\epsilon$ para obter a configuração do modelo que melhor reproduz os resultados obtidos em campo. Finalmente, o modelo é utilizado para avaliar o potencial eólico na região de interesse em Herval, RS. O domínio computacional que representa a região de interesse é gerado no OpenFOAM com o auxílio da funcionalidade *terrainBlockMesher*, sendo os dados topográficos obtidos a partir de modelos de elevação digitais SRTM disponibilizados no formato *raster* no site da USGS, que são editados e exportados no formato adequado com auxílio dos *softwares* livres de sistemas de informação geográficos QGIS e GRASS GIS, ambos parte do projeto OSGeo, assim como *scripts* de Python.

O Python é uma linguagem de *script* de alto nível que é capaz de ler e escrever arquivos de texto, como os *dictionaries* do OpenFOAM. A distribuição utilizada foi a Anaconda, que inclui módulos de diversas áreas do conhecimento que podem ser utilizados pelo usuário (ANACONDA, INC., 2018). Em particular, o módulo *Pandas* fornece recursos para ciência de dados, como manipulação e filtragem de planilhas de dados e *dataframes*, sendo adequado para o tratamento de dados de vento nas etapas de pré-processamento e pós-processamento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente estudo tem interesse na produção de energia elétrica através da conversão da energia presente nos ventos. Assim, convém definir mais detalhadamente os conceitos de vento e de camada limite atmosférica, por se tratar da região da atmosfera onde o aproveitamento da energia eólica é viável. Essa seção tem como objetivo abordar esses assuntos, juntamente com o processo de conversão da energia dos ventos, a fim de contextualizar o estudo e facilitar a sua compreensão.

2.1 O Vento

Define-se o vento como o movimento do ar atmosférico que nos cerca. O vento é causado, principalmente, pela rotação da Terra (efeito Coriolis) e pelos gradientes horizontais de pressão nascidos do aquecimento solar não-uniforme da superfície da Terra (ZHANG, 2015).

A atmosfera terrestre pode ser dividida verticalmente em diversas camadas, sendo a camada mais externa, a Termosfera, situada em torno de 85 km acima da superfície. A camada mais próxima da superfície é denominada Troposfera, com extensão vertical de 11 km, e, dessa camada, é de interesse a estudos de aproveitamento eólico a porção mais inferior, denominada *Camada Limite Atmosférica* (CLA). Além disso, a atmosfera terrestre também apresenta diferentes escalas horizontais, que variam desde o tamanho do planeta até milímetros, e um processo de transferência de energia da maior escala, conhecida como sinótica, às menores escalas (ZHANG, 2015).

Dependendo da escala, certos fenômenos são mais dominantes na dinâmica atmosférica. Na escala sinótica, são de interesse fenômenos como a circulação global e ciclones extratropicais, enquanto os fenômenos de maior relevância para as meso e microescalas são, entre outros, o efeito da topografia e dos fluxos turbulentos próximos à superfície. No estudo dos ventos aplicado à avaliação de potencial eólico, é dada mais relevância aos fenômenos de meso e microescala, devido à maior proximidade à escala dos parques eólicos (ZHANG, 2015).

2.2 Definição de Camada Limite Atmosférica

O conceito de camada limite atmosférica foi introduzido no século 20 por cientistas como Ludwig Prandtl, que perceberam que havia uma zona de transição entre a superfície, que impõe uma condição de não-deslizamento, e a atmosfera livre, onde encontram-se ventos aproximadamente geostróficos (PETRY, 2002). Ventos geostróficos são ventos teóricos que ocorreriam através de um balanceamento exato entre o gradiente de pressão e o efeito Coriolis, desprezando as forças de atrito. A atmosfera livre encontra-se acima da camada limite atmosférica, que estende-se, tipicamente, 100-3000 m acima do nível da superfície, de acordo com as condições meteorológicas.

A camada limite atmosférica é principalmente caracterizada por intensos fluxos turbulentos de quantidade de movimento, calor e umidade. Stull (1988) define a camada limite atmosférica como “a parte da atmosfera que é influenciada diretamente pela presença da superfície da Terra, e responde às suas forçantes em escalas de menos de uma hora”. As principais forçantes que a superfície impõe são o atrito, a radiação, a evapotranspiração, a emissão de poluentes e a topografia, sendo essa última o tópico desse estudo.

2.3 Estrutura da Camada Limite Atmosférica

A camada limite atmosférica é normalmente dividida em duas seções principais, que apresentam características dinâmicas distintas. A região superior, conhecida como camada de Ekman, é mais independente da superfície, e é caracterizada pelo papel importante do efeito Coriolis no balanço de forças. A força de Coriolis é uma força inercial que representa o movimento relativo do vento em relação a rotação da Terra, e seu efeito de aceleração é dado pela Eq. 2.1.

$$\alpha_c = 2\Omega \times U \quad (2.1)$$

onde α_c é a aceleração relativa [m/s^2], U é a velocidade do vento [m/s] e Ω [rad/s] é a velocidade angular da Terra.

Um parâmetro conveniente para determinar a importância relativa da força de Coriolis em relação às forças inerciais é o número de Rossby (Ro), um parâmetro adimensional definido pela Eq. 2.2.

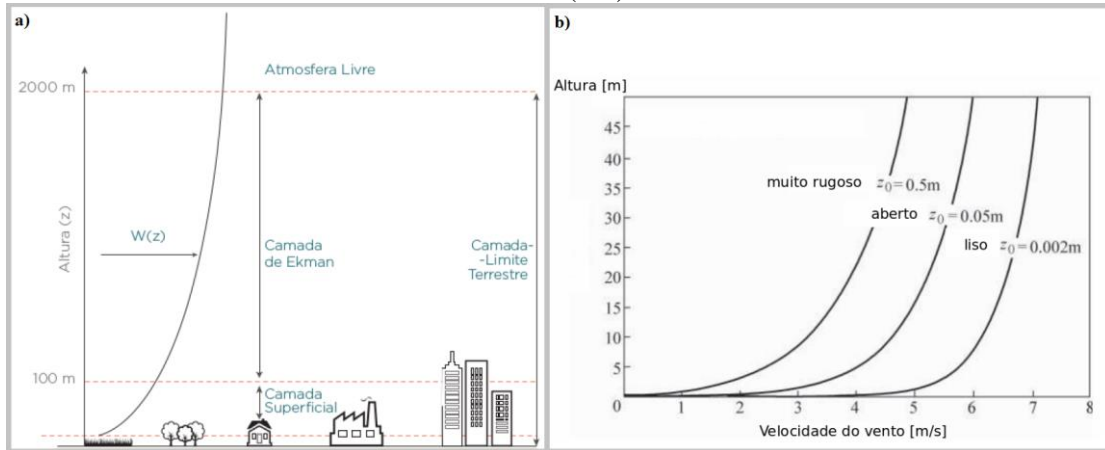
$$Ro = \frac{U}{L 2\Omega \sin(\varphi)} \quad (2.2)$$

onde L é a escala de comprimento característica [m] e φ é a latitude do local [°]. Um número de Rossby baixo indica que o efeito Coriolis tem grande influência no escoamento, enquanto um número de Rossby alto indica o oposto.

A região abaixo da camada de Ekman é conhecida como camada limite superficial (CLS), com espessura de aproximadamente 100 m, onde efeitos de convecção e atrito superficial tem um grande efeito sob os perfis de temperatura, umidade e vento, sendo esse último representado pelo perfil logarítmico de velocidade nesta região. A altura em relação ao solo onde a velocidade do escoamento teoricamente torna-se zero de acordo com o modelo logarítmico é o *comprimento de rugosidade aerodinâmico* z_0 do terreno [m], cujo efeito na curvatura do perfil de velocidade do vento é apresentado na Figura 2.1b. De acordo com Stull (1988), uma peculiaridade da camada limite superficial é que os fluxos turbulentos de quantidade de movimento e calor são relativamente uniformes ao longo da vertical, sendo essa região também denominada *camada de fluxo constante*. Na camada superficial, é padrão assumir equilíbrio entre as forças de pressão e as forças de atrito com a superfície.

A Figura 2.1a apresenta um esquema padrão da estrutura da camada limite atmosférica, porém é importante considerar que as proporções apresentadas variam de acordo com as condições atmosféricas e com a hora do dia.

Figura 2.1 – Estrutura padrão da CLA (esq.) e Efeito da rugosidade aerodinâmica no cisalhamento do vento (dir.)



Fonte: Retirado de (SCHUBERT e ELETROSUL, 2014) (esq.), (RADÜNZ, 2018) (dir.)

2.4 Estabilidade e Estratificação da Camada Limite Atmosférica

Em sua modelagem, a atmosfera normalmente é composta por parcelas de ar com densidades variáveis, que ascendem e descendem adiabaticamente. Em uma atmosfera neutra, a taxa com a qual a temperatura decresce é chamada de taxa adiabática, denotada por Γ_a [K/m] e expressa pela Eq. 2.3 (ARYA, 2001).

$$\Gamma_a = \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{g}{c_p} \quad (2.3)$$

onde g é a aceleração gravitacional [m/s²] e c_p é o calor específico do ar [J/kgK].

No entanto, as forçantes impostas pela superfície à atmosfera, principalmente na forma de trocas diretas de calor, podem fazer com que o perfil de temperatura seja diferente da taxa adiabática, tornando a atmosfera estratificada. A tendência natural é que, se uma parcela estiver mais quente que o ar ao seu redor, ela irá ascender e terá uma pressão menor, expandindo e resfriando no processo. Para comparar parcelas de

ar em pressões diferentes, utiliza-se a temperatura potencial θ , que representa a temperatura que uma parcela de ar teria ao ser trazida adiabaticamente até uma pressão de referência, dada pela Eq. 2.4.

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (2.4)$$

onde T é a temperatura da parcela [K], p_0 é uma pressão de referência [Pa], geralmente ao nível do mar; p é a pressão da parcela [Pa] e R é a constante dos gases ideais para o ar [J/kg K]. A partir da taxa de variação vertical da temperatura potencial é possível definir três condições de estabilidade atmosférica:

- Atmosfera Neutra: $\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0$

Nesse caso, não há uma tendência de supressão nem de intensificação de movimento vertical. Quando a atmosfera está neutra, são desconsideradas as forças de empuxo, e, portanto, considera-se que a turbulência se origina apenas do atrito com a superfície e da tensão de cisalhamento do vento. Atmosferas neutras são raramente observadas, mas são aproximações razoáveis quando a velocidade do vento é elevada e há cobertura de nuvens durante o dia.

- Atmosfera Estável: $\frac{\partial \theta}{\partial z} > 0$

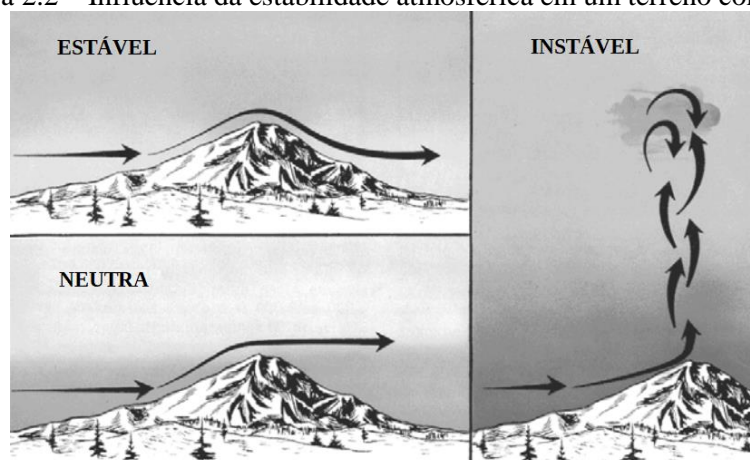
Em uma atmosfera estável, há uma supressão do movimento vertical, pois quando uma parcela de ar ascende adiabaticamente ela encontra-se mais fria do que o ar ao seu redor, tendendo a retornar para sua posição inicial. Nesse caso, as componentes verticais de flutuação turbulenta são menores. Atmosferas estáveis são observadas principalmente quando ocorre inversão térmica.

- Atmosfera Instável: $\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0$

Quando a atmosfera está instável, uma parcela de ar que ascende resfria, porém continua mais quente que o ar ao seu redor, intensificando o movimento vertical. Nesse caso, as componentes verticais de flutuação turbulenta são maiores, e os efeitos de empuxo são mais intensos, tornando-se ainda mais relevantes com o aumento da altura. São características de dias quentes e ensolarados.

A Figura 2.2 ilustra a influência da estabilidade atmosférica em um escoamento sobre um terreno complexo.

Figura 2.2 – Influência da estabilidade atmosférica em um terreno complexo



Fonte: Adaptado de (CAFIRESCHI, 2019)

2.5 Equações Governantes

Os fenômenos de interesse na camada limite atmosférica envolvem a transferência de massa, espécies químicas, quantidade de movimento e calor. A conservação de massa é descrita pela Eq. 2.5, enquanto o transporte de qualquer grandeza genérica ϕ pode ser expresso pela Eq. 2.6, conhecida como *equação do transporte* de ϕ .

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) = \Gamma \nabla^2 \phi + S_\phi \quad (2.6)$$

onde ρ é a massa específica [kg/m³], u é a velocidade [m/s], t é o tempo [s] e ξ é um coeficiente de difusão, cuja unidade varia com ϕ . Percebe-se que a Eq. 2.5 é simplesmente a Eq. 2.6 com $\phi = 1$ e $\xi = S_\phi = 0$. As implicações físicas de cada termo são descritas abaixo:

- O Termo Temporal $\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}$
Representa a variação temporal de ϕ no volume de controle analisado.
- O Termo Divergente $\nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi)$
Representa o transporte advectivo de ϕ por um campo de velocidades.
- O Termo Laplaciano $\xi \nabla^2 \phi$
Representa o transporte difusivo de ϕ , ou seja, o transporte por seu próprio gradiente.
- O Termo Fonte S_ϕ
Representa taxas de geração volumétricas de ϕ , que podem ser positivas (fontes) ou negativas (sumidouros).

Portanto, as equações que definem o movimento dos ventos na camada limite atmosférica são a Eq. 2.5 juntamente com a Eq. 2.6, escrita para o transporte de quantidade de movimento em um escoamento incompressível, que, em notação indicial, resulta na Eq. 2.7.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (2.7)$$

onde p é a pressão [Pa], μ é a viscosidade dinâmica [N s/m²] e S_M é o termo fonte da equação de quantidade de movimento, que representa forças externas como a gravidade e o efeito Coriolis.

2.6 Turbulência

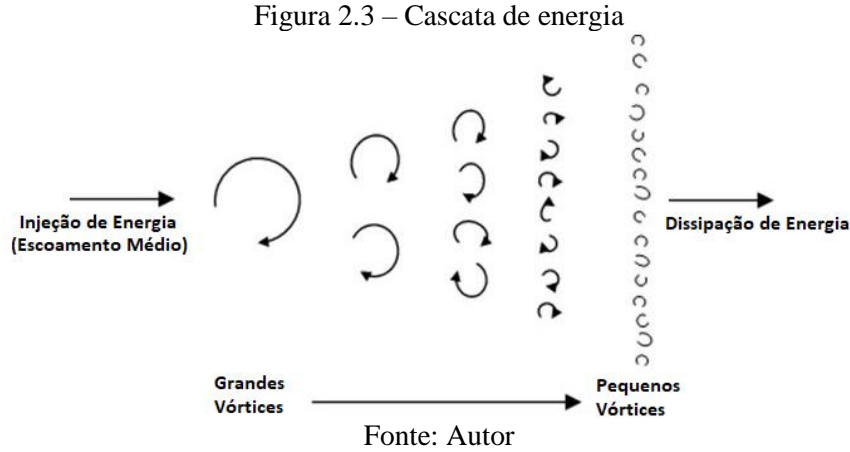
Assim como a maior parte dos escoamentos de interesse para as ciências e engenharias, os escoamentos de camada limite atmosféricos são altamente turbulentos. Em regimes turbulentos, escoamentos apresentam comportamento caótico e transiente, com flutuações de velocidade de caráter tridimensional, o que potencializa a transferência de massa, quantidade de movimento e calor, que é o principal atributo da camada limite atmosférica.

Um escoamento torna-se turbulento quando sua inércia é muito superior à sua viscosidade, o que pode ser avaliado através do parâmetro adimensional denominado *número de Reynolds* (Re). Um número de Reynolds muito alto caracteriza um escoamento turbulento, e pode ser causado por uma elevada velocidade, um elevado comprimento característico, uma baixa viscosidade ou ainda por uma combinação desses fatores (FOX, 2012).

Escoamentos turbulentos também são caracterizados por um espectro de diferentes escalas de estruturas rotacionais denominadas vórtices turbulentos, onde um vórtice grande pode conter diversos

vórtices menores. Os vórtices maiores possuem efeitos inerciais dominantes e extraem energia cinética do escoamento médio, criando um movimento onde eles se quebram em vórtices cada vez menores, transferindo energia ao longo desse processo, até atingir a menor escala, onde os efeitos viscosos são dominantes e essa energia é dissipada em calor (POPE, 2000). Esse fenômeno é chamado de *cascata de energia* e é ilustrado na Figura 2.3.

Em particular, a turbulência na camada limite atmosférica é caracterizada por uma alta gama de escalas de tempo e comprimento, sendo os menores vórtices da ordem de milímetros enquanto os maiores chegam à espessura da camada limite.



É importante ressaltar que, embora escoamentos turbulentos sejam irregulares e caóticos, eles são determinísticos e descritos pelas equações de Navier-Stokes (Eq. 2.7). No entanto, a Eq. 2.7 possui soluções analíticas apenas para casos muito simples, tornando necessária uma abordagem numérica, que geralmente possui custos computacionais muito proibitivos caso tente-se resolver todas as suas escalas. Assim, tornam-se necessários modelos de turbulência, que simulam o comportamento desse fenômeno sem ter que resolver numericamente todas as escalas do escoamento.

Os modelos de turbulência mais utilizados em simulações de camada limite atmosférica são baseados na *decomposição de Reynolds*, que permite analisar escoamentos turbulentos em um regime permanente “médio” (PETRY, 2002). Nessa decomposição, a velocidade é dividida entre uma componente média \bar{u}_i , que é independente do tempo, e uma componente flutuante, u'_i , tal que $u_i = \bar{u}_i + u'_i$. Aplicando a decomposição de Reynolds à Eq. 2.7, e utilizando um procedimento análogo para o campo de pressão, chega-se à equação de Navier-Stokes com médias de Reynolds, ou RANS (Eq. 2.8).

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2.8)$$

Percebe-se que surge um termo extra na Eq. 2.8, $-\rho \overline{u'_i u'_j}$, que representa o efeito das flutuações turbulentas. Esse termo é conhecido como *tensor de Reynolds*, e é a causa do chamado *problema de fechamento* da turbulência, pois torna o número de incógnitas do problema maior que o número de equações (POPE, 2000). Existem diversas maneiras de tratar o problema do fechamento, porém esse estudo irá focar apenas no método utilizado pelo modelo $k-\varepsilon$.

O modelo $k-\varepsilon$ utiliza o conceito de viscosidade turbulenta, μ_t (Eq. 2.9), baseado em uma analogia entre a viscosidade molecular e o comportamento dos vórtices turbulentos (LAUNDER e SPALDING, 1974).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

onde C_μ é uma constante adimensional, k é a energia cinética turbulenta [m^2/s^2] (Eq. 2.10) e ε é a taxa de dissipação de turbulência [m^2/s^3]. Assim, na Eq. 2.8, a viscosidade μ é a soma da viscosidade do fluido e a viscosidade turbulenta μ_t .

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.10)$$

onde u' , v' e w' são as componentes flutuantes da velocidade nas direções x , y e z , respectivamente. No modelo k - ε , k e ε são obtidos através de duas equações de transporte adicionais, Eq. 2.11 e Eq. 2.12.

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (2.11)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon}{k} P_k - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2}{k} \quad (2.12)$$

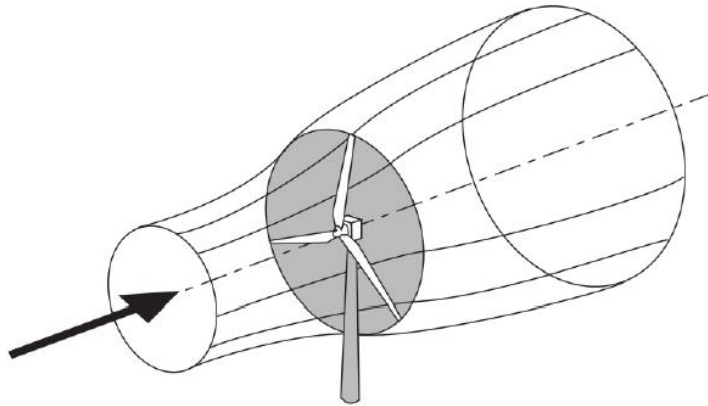
onde σ_k e σ_ε são os números de Prandtl de k e ε , respectivamente, e são constantes adimensionais; $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ também são constantes adimensionais, e P_k é a produção de energia cinética turbulenta por cisalhamento [W/m^3]. Utilizando a hipótese de Boussinesq (POPE, 2000), pode-se relacionar P_k com a taxa de deformação do escoamento médio (Eq. 2.13), resolvendo o problema do fechamento.

$$P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.13)$$

2.7 Conversão de Energia Eólica

As principais unidades conversoras de energia eólica são os aerogeradores de eixo horizontal e três pás, grandes turbinas que convertem a energia cinética do vento em torque mecânico em seus eixos. Betz (1919) determinou a potência máxima que pode ser extraída por um aerogerador, em função do diâmetro de suas pás e da energia cinética do vento incidente no seu eixo. A dedução foi baseada no princípio de conservação de massa, considerando um *tubo de corrente* que envolve uma área de seção transversal A que corresponde à área varrida pelas pás da turbina, como apresentado na Figura 2.4, e chegou ao resultado analítico de 59,3%. Em outras palavras, isso significa que um aerogerador poderá converter, no máximo, 59,3% da energia eólica disponível na área de varredura da turbina em potência mecânica no seu eixo (BURTON, 2011). Esse valor foi denominado *limite de Betz*.

Figura 2.4 – Tubo de corrente



Fonte: Retirado de (BURTON, 2011)

Uma generalização pode ser obtida a partir do estudo de Betz, permitindo definir um *coeficiente de potência*, C_p , que deve ser inferior ao limite de Betz. Com o coeficiente de potência, é possível calcular a potência do aerogerador:

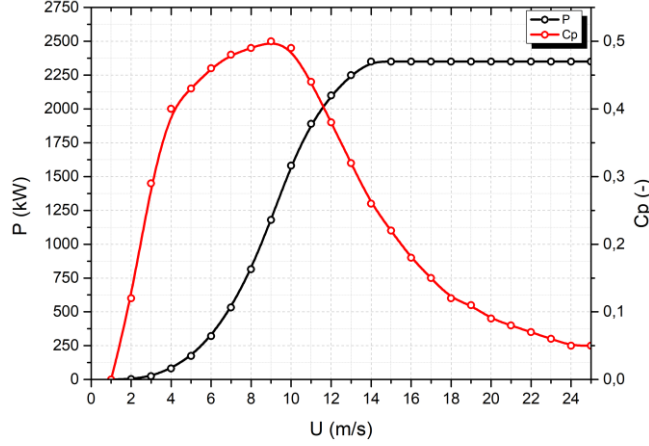
$$P = \frac{1}{2} \eta_m \eta_e C_p \rho A U^3 \quad (2.14)$$

onde η_m e η_e são as eficiências mecânica e elétrica do aerogerador, respectivamente.

A principal característica de um aerogerador é sua *curva de potência*, que é única para cada modelo e disponibilizada pelos fabricantes. Consistem em curvas de potência do aerogerador em função da

velocidade do vento, sendo frequentemente apresentadas junto a curvas de C_p em função desse mesmo parâmetro. Para fins ilustrativos, a Figura 2.5 apresenta a curva característica de um modelo de aerogerador existente no mercado.

Figura 2.5 – Curva de potência de um aerogerador real



Fonte: Autor

Observam-se três valores relevantes: a velocidade de *cut-in*, nesse caso 2 m/s, que indica a velocidade mínima necessária para o aerogerador produzir energia elétrica, a velocidade de *cut-out*, 25 m/s, a partir da qual o aerogerador cessa a produção de energia elétrica, e a *potência nominal*, 2300 kW, que é a máxima potência que o aerogerador pode entregar. Além disso, percebe-se que a velocidade de maior eficiência, 9 m/s, não corresponde à potência nominal, o que é usual.

Como a velocidade do vento na altura da turbina é altamente variável, torna-se necessário incluir uma análise estatística na avaliação do potencial eólico de uma região. Considera-se que a distribuição de Weibull é adequada para representar a variabilidade da velocidade dos ventos (BURTON, 2011). Utilizando essa distribuição, é possível definir uma função densidade de probabilidade, que traz uma representação da frequência f com a qual uma dada velocidade U ocorre.

$$f = \frac{\alpha}{C} \left(\frac{U}{C} \right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{U}{C} \right)^{\alpha}} \quad (2.15)$$

onde α é o parâmetro de forma de Weibull e C é o parâmetro de escala [m/s], determinado por:

$$C = \frac{\bar{U}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \quad (2.16)$$

onde \bar{U} é a velocidade média anual [m/s] e o denominador é a função Gama, denotada por Γ .

De forma geral, são desejados valores altos de α , pois, conforme α aumenta, a dispersão de velocidades em torno da média diminui, estreitando a curva horizontalmente.

Assim, juntando as equações 2.14 e 2.15, chega-se a uma expressão que permite o cálculo da energia anual gerada, ou EAG, para um aerogerador.

$$EAG = 8760 \sum_{i=1}^{N_U} f_i P_i \quad (2.17)$$

onde i indica a classe da velocidade avaliada no cálculo, f_i a frequência de ocorrência da classe de velocidade i , P_i a potência elétrica desenvolvida pelo aerogerador quando submetido à classe de velocidade i , e N_U o número total de classes de velocidade. Os valores de P_i são obtidos através das curvas de potência fornecidas pelos fabricantes, que tem a forma apresentada na Figura 2.5.

3 METODOLOGIA E MODELAGEM

Nessa seção encontram-se as informações referentes ao desenvolvimento do modelo numérico utilizado no estudo, baseando-se nos conceitos introduzidos na fundamentação teórica, assim como as metodologias de pré e pós-processamento e a configuração do pacote utilizado para realizar as simulações, o OpenFOAM. Quanto ao estudo de caso, são descritas as metodologias de seleção de um sítio adequado e de obtenção do domínio computacional a partir de dados de sensoriamento remoto.

3.1 Hipóteses Simplificativas do Modelo

Esse estudo emprega as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS) (Eq. 2.8) para modelar o comportamento da camada limite atmosférica, juntamente com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ (Eqs. 2.9-2.13). Para tal, as seguintes hipóteses simplificativas são adotadas:

- Ausência de Forças de Empuxo

A camada limite atmosférica é considerada neutra nesse estudo, assumindo regime permanente e que a velocidade do vento é alta o suficiente para que fluxos verticais de quantidade de movimento sejam ignorados. Uma metodologia para a modelagem de efeitos de empuxo em casos similares foi desenvolvida por (KOBELITZ *et al.*, 2013), e irá ser adaptada para modelos futuros.

- Ausência de Modelos de Cobertura Vegetal

No OpenFOAM, a modelagem da rugosidade superficial é limitada a funções de parede, que utilizam o conceito de comprimento de rugosidade aerodinâmico z_0 . Uma alternativa para a implementação de cobertura vegetal no modelo é representá-la através de termos fonte nas equações de transporte de quantidade de movimento e dos escalares turbulentos k e ε , onde ela atua como um sumidouro. Essa metodologia é detalhada em (SEGERSSON, 2017), e está sendo implementada no modelo.

- Ausência da Força Coriolis

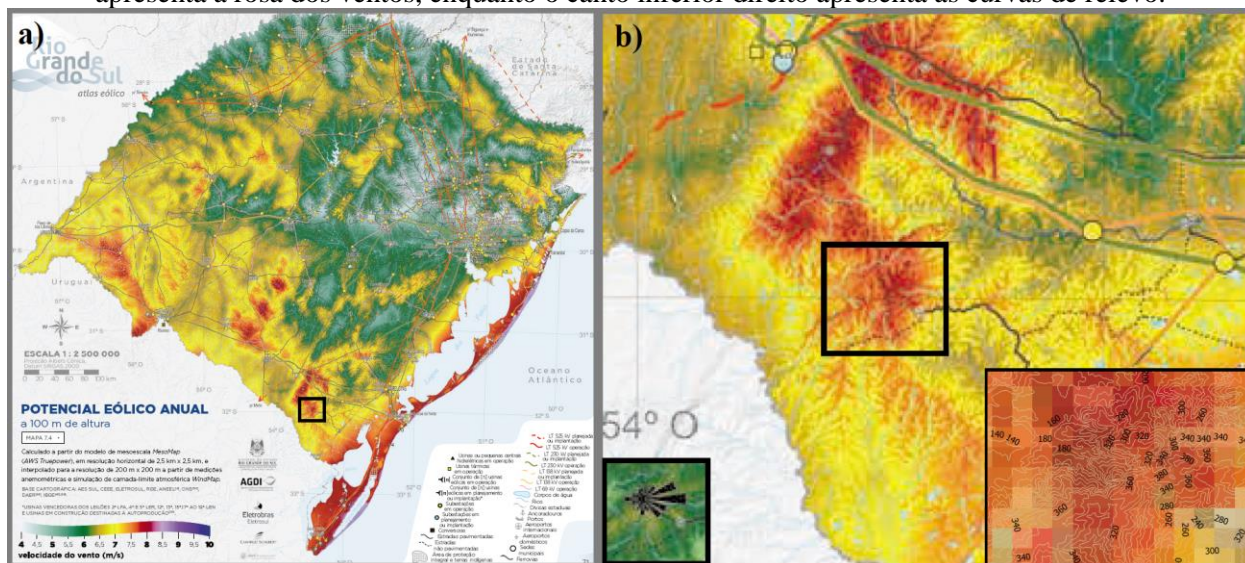
A força Coriolis pode ser adicionada às equações de transporte no OpenFOAM simplesmente acrescentando um termo fonte na forma da Eq. 2.1 que inclui um vetor customizado que representa a rotação da Terra. O efeito desta força não foi implementado neste estudo pois é pouco relevante para os casos analisados, onde apenas a parte inferior da camada limite é de interesse, resultando em um alto número de Rossby (Eq. 2.2), mas pode facilmente ser acrescentado em outras aplicações

3.2 Seleção da Região de Interesse

De forma geral, os fatores que devem ser avaliados na prospecção de um sítio para aproveitamentos eólicos podem ser divididos em fatores diretamente relacionados ao vento, como sua velocidade média e direção predominante, e fatores secundários, como a presença de reservas indígenas ou de subestações ligadas ao sistema interligado nacional. No caso desse estudo em particular, também é interessante selecionar uma região de topografia complexa, para justificar o emprego do modelo CFD.

O Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (SCHUBERT e ELETROSUL, 2014) é uma boa fonte de dados iniciais para a prospecção de um sítio, pois utiliza simulações de mesoescala calibradas com dados de torres anemométricas para trazer valores de velocidade média e direção dos ventos nas alturas de 100 m e 150 m. Por se tratar de um estudo de caso, foi dada prioridade aos fatores diretamente relacionados ao vento e à topografia para a seleção do sítio, e a área indicada na Figura 3.1, localizada no município de Herval, de coordenadas geográficas 32°9'18''S e 53°31'44''O, foi escolhida.

Figura 3.1 – Seleção da região de interesse no Atlas Eólico. Na Figura b), o canto inferior esquerdo apresenta a rosa dos ventos, enquanto o canto inferior direito apresenta as curvas de relevo.



Fonte: Adaptado de (SCHUBERT e ELETROSUL, 2014)

Baseando-se em dados do Atlas Eólico e de mapas de relevo e hidrografia, é possível concluir que a região possui alto potencial eólico, com velocidades médias de **8 m/s** a 100 m de altura, assim como topografia complexa, com uma variação acima de 200 m entre os pontos de maior e menor altitude do terreno. Além disso, a região apresenta ventos predominantemente de direção Oeste-Leste, um fator de forma de Weibull de $\alpha = 2,5$, e o solo principalmente coberto por culturas agrícolas e pastagens, o que justifica o emprego de um comprimento de rugosidade $z_0 = 0,1$ m. No entanto, o uso de um comprimento de rugosidade uniforme para todo o terreno, juntamente com a ausência de um modelo de vegetação, configuram limitações do modelo atual, pois ambos afetam diretamente a curvatura do perfil de velocidade do vento (RADÜNZ, 2018).

Quanto aos fatores secundários, a região também se mostrou adequada, pois não está situada em área indígena ou de conservação ambiental, não é próxima de grandes corpos d'água ou aeroportos, e é de relativamente fácil acesso através da estrada RS-655. O principal desafio é a ausência de linhas de transmissão (LTs) ligadas ao SIN nas proximidades, com a LT de 230kV mais próxima localizada em Basílio. No que diz respeito a questão ambiental, além de evitar áreas de conservação, o estudo também procurou respeitar as áreas de preservação permanente no terreno, considerando uma distância mínima de 30 m entre os aerogeradores e qualquer curso d'água no processo de *micrositing*.

3.3 Pré-Processamento

O pré-processamento é a etapa de configuração do pacote para que esse possa realizar as simulações. Inclui o processo de geração da malha e do domínio computacional, assim como a configuração das condições iniciais e de contorno, dos *solvers* numéricos empregados, e dos métodos de discretização aplicados. Uma ilustração do formato de um *case* do OpenFOAM é apresentada no Apêndice A.

Todas as simulações utilizaram como base o *case* de avaliação de potencial eólico dos tutoriais do OpenFOAM, *turbineSiting*. Nesse estudo, em relação ao tutorial base do OpenFOAM, foi necessário alterar o domínio computacional, os esquemas de discretização do termo divergente e do termo gradiente, uma função de parede e o *solver* algébrico utilizado para a velocidade e os escalares turbulentos.

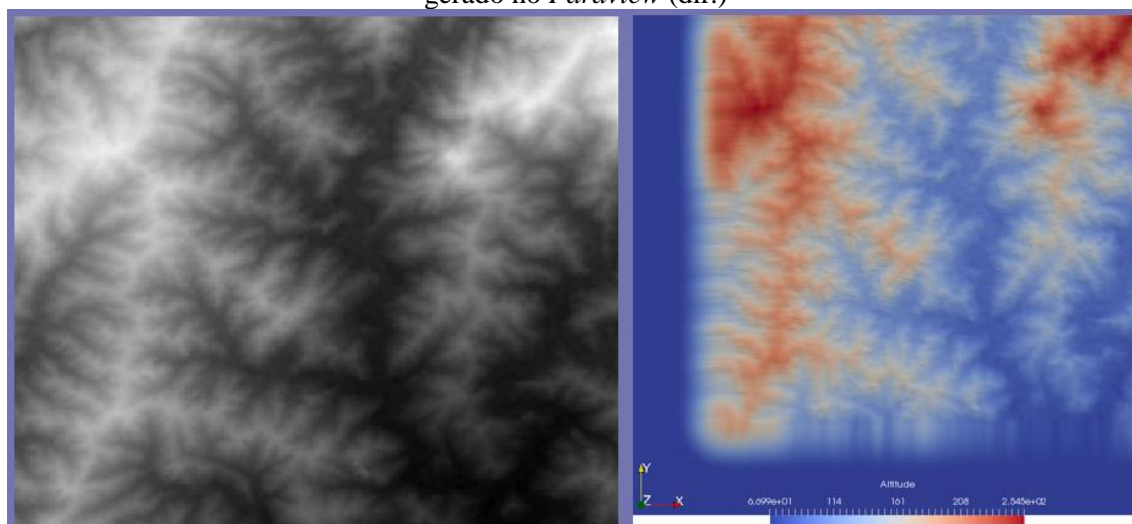
3.3.1 Geração dos Domínios Computacionais

O OpenFOAM possui duas funcionalidades próprias para a geração de malhas: *blockMesh*, que cria malhas estruturadas, e *snappyHexMesh*, que gera malhas não-estruturadas, e não será abordado nesse estudo. Na estrutura padrão de um *case* do OpenFOAM, o aplicativo *blockMesh* é configurado através do arquivo de texto *blockMeshDict*, localizado na pasta *polyMesh*, e executado no diretório de trabalho,

gerando os arquivos com informações referentes às células apresentados na Figura A, localizada no Apêndice A. O domínio computacional da região de interesse, assim como o de Askervein, a colina utilizada para a validação, consiste em uma caixa de escala quilométrica com a superfície do seu terreno situada na extremidade inferior e distante das fronteiras, para que não ocorram erros devido à proximidade das condições de contorno impostas na fronteira.

O primeiro passo para gerar o domínio computacional da região de interesse foi obter um MDE (Modelo Digital de Elevação), que consiste num arquivo *raster* georreferenciado onde cada pixel possui um valor de altitude associado. O site *EarthExplorer*, sediado pela *United States Geological Survey* (USGS) disponibiliza modelos digitais de elevação da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). O arquivo *raster* é, então, carregado no programa de Sistemas de Informação Geográficas QGIS, de código livre, onde ele é manipulado a fim de recortar a região de interesse, apresentada na Figura 3.2. A área recortada tem dimensões de aproximadamente 10 x 10 km, superior ao tamanho da região de interesse, para que o efeito da imposição das condições de contorno não seja tão pronunciado. Na sequência, o *raster* é convertido de coordenadas geográficas para coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator), e carregado no pacote de código livre GRASS GIS, onde um *script* de Python é utilizado para transformar o MDE em uma superfície 3D no formato *.stl* (*stereolithography*) (HARDIN, 2013).

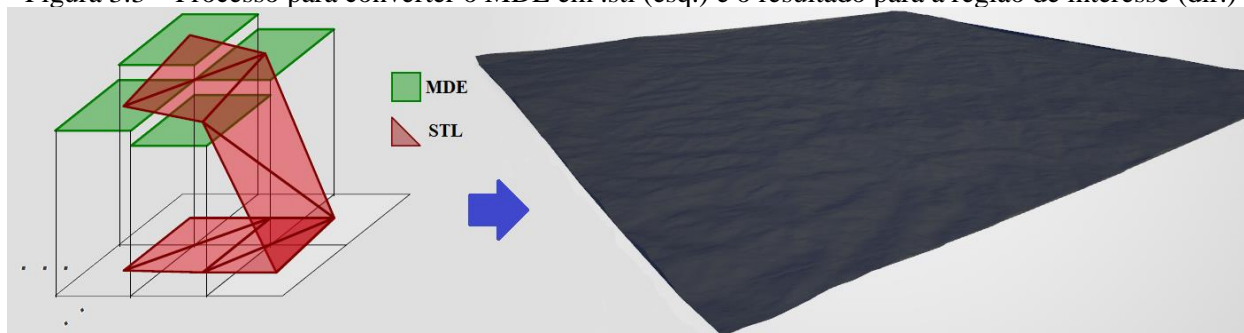
Figura 3.2 – Recorte da região de interesse no MDE (esq) e o mapa de altitude da região de interesse gerado no Paraview (dir.)



Fonte: Autor

Arquivos *.stl* descrevem a superfície de um objeto 3D através de triangulação, com os vértices e vetores unitários normais dos triângulos servindo como referências no sistema de coordenadas cartesiano. No *script* para o GRASS GIS, as faces são geradas em grupos de dois, conectando o centro de quatro células adjacentes do *raster* no MDE e projetando os pontos no plano inferior. A Figura 3.3 ilustra o processo de conversão do MDE em *.stl* e a superfície obtida para o terreno de interesse através deste processo.

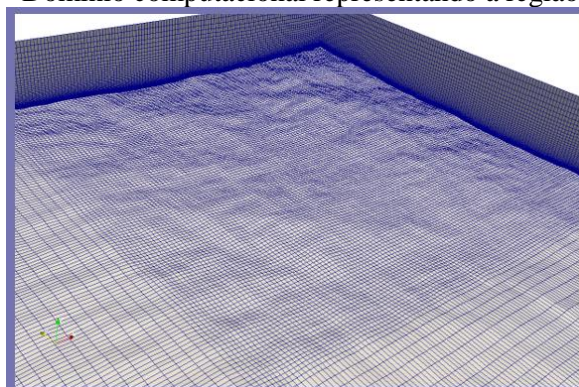
Figura 3.3 – Processo para converter o MDE em *.stl* (esq.) e o resultado para a região de interesse (dir.)



Fonte: Adaptada de (HARDIN, 2013) (esq.), Autor (dir.)

Após gerado o arquivo .stl, foi empregada a funcionalidade *blockMesh* juntamente com a ferramenta de código aberto *terrainBlockMesher* (SCHMIDT *et al.*, 2012). Essa ferramenta é capaz de gerar uma malha estruturada, no formato de um arquivo *blockMeshDict*, a partir de um arquivo .stl do terreno de interesse, e, além disso, também possui uma funcionalidade para dividir o domínio computacional em blocos com diferentes resoluções de malha, para que a malha seja mais refinada na região de interesse. Dessa forma, uma razão de crescimento suave foi utilizada para os volumes localizados próximos às superfícies de interesse. De forma análoga ao *snappyHexMesh*, que é nativo ao OpenFOAM, o *terrainBlockMesher* é configurado através de um arquivo dicionário localizado no diretório *system*, *terrainBlockMesherDict*, enquanto o arquivo com a superfície, no formato .stl, é inserido em uma pasta *triSurface* no diretório *constant*. A Figura 3.4 mostra o domínio computacional gerado através dessa metodologia, representando a região de interesse.

Figura 3.4 – Domínio computacional representando a região de interesse



Fonte: Autor

Nas simulações de ambas as regiões, as dimensões dos domínios computacionais são mantidas constantes ao longo da análise de refinamento da malha, e apenas o número total de células é variado. Como a razão de crescimento das células é uma função da altura da primeira célula acima da superfície, Z_w , os domínios são refinados em função desse parâmetro, como indicado na Tabela 3.1. Já que o interesse é na simulação da camada superficial, os domínios possuem alturas da ordem de 1 km para não influenciar os resultados nas regiões próximas à superfície, e não porque há interesse na simulação de toda a extensão da CLA (RADÜNZ, 2018).

Tabela 3.1 – Parâmetros das geometrias analisadas

| Malha | Nº de Volumes | Z_w [m] | Dimensões [km] |
|----------------|---------------|-----------|----------------|
| Askervein – M1 | 1.152.000 | 5,0 | 6 x 5 x 1,5 |
| Askervein – M2 | 2.064.860 | 2,5 | 6 x 5 x 1,5 |
| Askervein – M3 | 3.744.000 | 1,0 | 6 x 5 x 1,5 |
| Askervein – M4 | 5.713.200 | 0,5 | 6 x 5 x 1,5 |
| Herval – M1 | 1.192.500 | 5,0 | 10 x 10 x 1,3 |
| Herval – M2 | 2.683.124 | 2,0 | 10 x 10 x 1,3 |
| Herval – M3 | 6.648.072 | 1,0 | 10 x 10 x 1,3 |
| Herval – M4 | 10.190.700 | 0,5 | 10 x 10 x 1,3 |

3.3.2 Condições de Contorno

Em todos os domínios, a região de entrada é definida como a fronteira do domínio computacional que corresponde à direção predominante do vento (oeste, no caso da região de interesse) e a região de saída como a fronteira oposta à região de entrada. A condição de contorno aplicada nos lados que não são classificados como entrada ou saída e no topo é *free-slip*, que define que os gradientes perpendiculares à superfície devem ser nulos, enquanto na saída é aplicada uma condição *constant pressure*, que determina que a pressão é constante e igual à atmosférica.

Para a condição na entrada, *inlet*, são aplicados perfis de velocidade e de escalares turbulentos diretamente na fronteira do domínio. Utilizando as hipóteses simplificativas definidas na Seção 3.1 e assumindo pressão e tensão de cisalhamento constantes, é possível obter uma solução analítica para as equações 2.8, 2.11 e 2.12 (RICHARDS e HOXEY, 1993). Esses perfis, por serem soluções analíticas para o modelo k - ε , são naturalmente consistentes com o mesmo, desde que o número de Prandtl turbulento da taxa de dissipação σ_ε satisfaça a Eq. 3.4. Os perfis de solução são apresentados nas Equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (3.1)$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z + z_0)} \quad (3.3)$$

$$\sigma_\varepsilon = \frac{\kappa^2}{(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1})\sqrt{C_\mu}} \quad (3.4)$$

onde κ é a constante de Von Kármán, adimensional, e u_* é a velocidade de fricção [m/s], que relaciona a massa específica do ar ρ com a tensão de cisalhamento na parede τ_w através da expressão $\tau_w = \rho u_*^2$.

Nas simulações, o valor de u_* é obtido através da Eq. 3.1, substituindo um valor de U medido a uma altura de referência z . No caso da região de interesse, devido à falta de dados meteorológicos, os perfis de entrada são montados utilizando a velocidade média anual \bar{U} na altura de 100 m, disponibilizada pelo Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (SCHUBERT e ELETROSUL, 2014). O valor de z_0 também é informado nessa mesma fonte, permitindo a determinação de u_* e a confecção dos três perfis de entrada.

Na região do solo, a condição *no-slip*, ou não-deslizamento, que determina que a velocidade deve ser nula nessa região, foi definida para a velocidade U . Para as outras variáveis, a fim de evitar a necessidade de integrar as equações do modelo de turbulência na região do solo, foram aplicadas funções de parede, que modelam o comportamento dos escalares turbulentos.

Para a energia cinética turbulenta k , foi utilizada a condição *kqRWallFunction*, já implementada no tutorial base, que define um valor de k constante nessa região.

Para a taxa de dissipação de turbulência ε , foi necessário criar uma função de parede customizada, pois a função utilizada pelo OpenFOAM gerava inconsistências quando utilizada juntamente com os perfis de entrada definidos pelas Eqs 3.1-3.3. Como o OpenFOAM é um pacote de código aberto, foi possível acessar diretamente a função de parede original, *epsilonWallFunction* e criar uma cópia retificada, *epsilonAtmWallFunction*. Como definido por (BALOGH *et al.*, 2012), a consistência pode ser assegurada simplesmente acrescentando o comprimento de rugosidade à altura do ponto central do volume mais próximo da superfície, conforme exposto nas Eqs 3.5 e 3.6.

$$\varepsilon_P = \frac{C_\mu^{0,75} k^{1,5}}{\kappa(z_P)} \rightarrow \frac{C_\mu^{0,75} k^{1,5}}{\kappa(z_P + z_0)} \quad (3.5)$$

$$P_k = \frac{\tau_w^2}{\kappa C_\mu^{0,25} k_P^{0,5}(z_P)} \rightarrow \frac{\tau_w^2}{\kappa C_\mu^{0,25} k_P^{0,5}(z_P + z_0)} \quad (3.6)$$

onde o índice P denota o ponto central do volume mais próximo da superfície.

Para a viscosidade cinemática turbulenta ν_t , aplicou-se a função *nutkAtmRoughWallFunction*, já implementada no tutorial base, que é consistente com os perfis de entrada adotados.

3.3.3 Esquemas de Discretização

Para representar equações diferenciais parciais como a Eq. 2.6 na forma de equações algébricas que podem ser facilmente resolvidas por computadores, os *solvers* de CFD do OpenFOAM utilizam o Método dos Volumes Finitos (FVM), que requer a discretização das equações. Os esquemas de discretização adotados geralmente envolvem o uso do método de integração gaussiana para volumes finitos, embora o

OpenFOAM forneça outras opções, como, por exemplo, esquemas baseados no método dos mínimos quadrados (OPENFOAM FOUNDATION, 2018). O método gaussiano de integração consiste em somar os valores das variáveis nas faces das células; no entanto, os campos são normalmente calculados no ponto central das células. Dessa forma, o valor na face das células deve ser computado através da interpolação dos valores centrais (PATANKAR, 1980). Assim, um esquema de interpolação também deve ser definido, com alguns termos necessitando de esquemas particulares devido à dificuldade de seu tratamento numérico, sendo o termo divergente/advectivo, não-linear, o caso principal.

Os esquemas de discretização são configurados no arquivo *fvSchemes*, localizado no diretório *system*. Esse arquivo possui 6 diferentes entradas, que definem o esquema de discretização empregado pelo *solver* na avaliação de cada um dos termos da Eq. 2.6. Essas entradas são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Esquemas de discretização do arquivo *fvSchemes*

| Subdicionário | Categoria Matemática dos Termos |
|-----------------------------|---|
| timeSchemes | Derivadas temporais de 1ª e 2ª ordem |
| interpolationSchemes | Interpolação centro-face nas células |
| gradSchemes | Gradiente ∇ |
| divSchemes | Divergente $\nabla \cdot$ |
| snGradSchemes | Componente do gradiente normal à face da célula |
| laplacianSchemes | Laplaciano ∇^2 |

Caso o *solver* apresente resultados não-físicos, o OpenFOAM permite acrescentar limitadores aos esquemas de discretização. Por exemplo, no subdicionário **gradSchemes**, é possível utilizar: “**cellLimited Gauss Linear 1**”, onde o termo **cellLimited** indica que o esquema de interpolação (no caso, **Linear**) é limitado pelos valores dos pontos centrais das células adjacentes. O coeficiente **1** pode variar de 0 até 1, representando o grau da limitação (“**boundedness**”).

Os termos advectivos e difusivos possuem uma configuração semelhante. No caso dos termos advectivos, é possível acrescentar “**V**” no final do esquema para fazer com que o mesmo limitador seja aplicado para todas as componentes do campo vetorial, ao invés de utilizar um limitador para cada uma. Os termos difusivos, além de poderem usar limitadores, também dependem do subdicionário **snGradSchemes**, onde há opção de aplicar correções de ortogonalidade, sendo o grau de correção especificado em uma escala de 0 a 1 (OPENFOAM FOUNDATION, 2018).

A principal característica numérica dos esquemas de divergência é a difusividade numérica, representada pelo surgimento de um termo laplaciano no processo de discretização do termo divergente em escoamentos multidimensionais. A consequência da difusividade numérica é a suavização dos gradientes, e ela é causada principalmente devido ao desalinhamento entre o escoamento e as células da malha (PATANKAR, 1980). Esquemas de ordem superior diminuem o efeito da difusividade numérica, porém são mais instáveis em malhas com baixa ortogonalidade.

Nas simulações deste estudo, todos os termos não-temporais utilizaram o esquema gaussiano com interpolação linear, como definido no tutorial base, *turbineSiting*, com exceção do termo de divergência/advecção. Outra alteração em relação ao tutorial base foi o acréscimo de limitadores para garantir a estabilidade da simulação quando necessário. Como as simulações, assim como o tutorial base, foram em regime permanente, o termo temporal foi desconsiderado (configurado como *steadyState*).

O esquema de interpolação utilizado no tratamento do termo advectivo foi o QUICK (**Q**uadratic **U**pstream **I**nterpolation for **C**onvective **K**inematics), que realiza uma interpolação quadrática utilizando os pontos centrais dos dois últimos volumes a montante. Sendo c o centro de uma dada célula, para uma malha uniforme o esquema pode ser escrito como:

$$\phi_f = \frac{6}{8}\phi_{c-1} + \frac{3}{8}\phi_c - \frac{1}{8}\phi_{c-2} \quad (3.7)$$

Quanto ao erro numérico, o esquema QUICK é intrinsecamente de terceira ordem, porém, aplicado ao método de volumes finitos, acaba sendo efetivamente de segunda ordem (LEONARD, 1995).

Além do esquema QUICK, foram testados os esquemas *upwind*, de 1ª ordem, e *linearUpwind*, de 2ª ordem, nas simulações de Askervein. Foi constatado o efeito da difusividade numérica, e, como as malhas utilizadas possuem alta ortogonalidade, foi adotado o esquema QUICK, por apresentar melhor desempenho.

3.3.4 Demais Configurações

O *solver* utilizado foi o *simpleFoam*, que consiste em um algoritmo de solução para escoamentos turbulentos e incompressíveis em regime permanente. Ele também desconsidera efeitos térmicos, o que é adequado para a simulação da CLA neutra. O algoritmo de acoplamento pressão-velocidade utilizado foi o SIMPLE, com correções adicionais para não-ortogonalidade.

Quanto aos *solvers* algébricos, foram testadas 2 alternativas para o campo de pressão: o algoritmo PCG (Preconditioned Conjugate Gradient), baseado no método do gradiente conjugado, e o GAMG (Generalised Geometric-Algebraic Multi-Grid), que utiliza uma abordagem multi-malhas. O GAMG apresentou tempos de iteração muito menores, sem que houvesse perda de estabilidade, logo foi escolhido. Para o campo de velocidade e os escalares turbulentos, foram também testadas 2 alternativas: o algoritmo PBiCG (Preconditioned Bi-Conjugate Gradient), baseado no método do gradiente biconjugado, e o *smoothsolver*, utilizado no tutorial base. O PBiCG apresentou levemente menos oscilações nas simulações com esquemas de discretização de ordem superior, e foi escolhido por isso.

Por se tratarem de simulações de terrenos com elevação suave e com malhas estruturadas, puderam ser utilizados esquemas de discretização mais robustos. Os termos laplacianos foram configurados com uma correção de ortogonalidade máxima, e os termos gradientes foram discretizados da seguinte forma: **cellMDLimited Gauss linear 0.5**, ou seja, foi aplicado um limitador multidimensional com intensidade 0,5 ao esquema linear.

Além disso, foram utilizadas técnicas de subrelaxação, que envolvem o uso de um coeficiente com valor entre 0 e 1 para amortecer as mudanças na variável dependente de uma iteração para a outra, a fim de estabilizar a simulação (PATANKAR, 1980). Quanto mais próximo de 0 o coeficiente, maior o efeito da subrelaxação. Os valores de subrelaxação escolhidos foram de **0,3** para o campo de pressão, **0,7** para o campo de velocidades, e **0,4** para os campos dos escalares turbulentos, k e ε . No caso dos campos de pressão e velocidade os valores do tutorial base foram mantidos, porém a subrelaxação dos campos de k e ε foi aumentada a fim de reduzir o comportamento oscilatório observado nas simulações.

Finalmente, o critério de convergência adotado foi de resíduo eficaz (RMS) inferior à 1×10^{-4} . Além disso, todas as simulações foram realizadas em paralelo em um computador com 16 GB de memória RAM e 8 *cores* de 4 GHz. No OpenFOAM, simulações em paralelo são configuradas no arquivo *decomposePar*, localizado no diretório *system*. Nesse estudo, o arquivo *decomposePar* é configurado para dividir os domínios computacionais em quatro subdomínios de igual tamanho.

3.4 Pós-Processamento

A instalação do pacote OpenFOAM também conta com o software livre de código aberto *Paraview*, que possui diversas funcionalidades de pós-processamento como a visualização de campos e linhas de corrente, a extração de dados no domínio computacional, o cálculo de coeficientes aerodinâmicos, etc. Neste estudo, o *Paraview* é utilizado para visualizar o domínio computacional e gerar o mapa de velocidades da região de interesse. Por se tratarem de simulações em regime permanente, os dados foram extraídos na última iteração.

No OpenFOAM, a amostragem de valores durante a simulação é realizada através do arquivo de texto *sampleDict*, localizado no diretório *system*. Para as simulações de Askervein, foi configurada uma linha para medir os campos a 10 m do solo ao longo do domínio computacional, assim como linhas para medir o perfil vertical dos campos na entrada e no topo da colina. O tratamento dos dados meteorológicos de Askervein, assim como a geração de gráficos e curvas, foi realizado com o auxílio de *scripts* de *Python*.

Na região de interesse, o procedimento envolveu a geração de um mapa das velocidades médias a 100 m acima do solo, que envolveu o recorte do domínio computacional nessa altura. A partir desse mapa, foram localizadas as regiões de maior densidade de potência, determinando os posicionamentos dos aerogeradores nas mesmas. Depois de definidas as posições dos aerogeradores, foram extraídos os valores de velocidade média no ponto correspondente à altura do eixo de cada gerador. Os valores de velocidade média obtidos foram, então, utilizados para o cálculo da EAG.

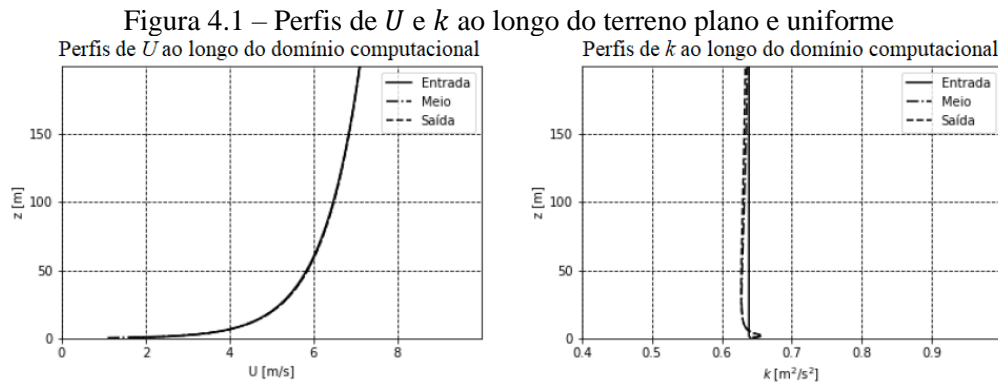
4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Esta seção apresenta as simulações realizadas utilizando a metodologia da seção prévia, juntamente com uma análise dos resultados destas simulações. É explicitada a metodologia de verificação do modelo, baseada na simulação da CLA neutra sem a atuação de forçantes, e, na sequência, são discutidas as simulações e campanhas de medição realizadas em Askervein, utilizadas para a validação do modelo. Finalmente, são apresentados os resultados das simulações realizadas no terreno de interesse, assim como o processo de *micrositing* realizado com base nos valores obtidos através das simulações.

4.1 Verificação do Modelo

O objetivo do modelo apresentado neste estudo é simular a CLA neutra e em regime permanente. Isso significa que, na ausência de forçantes, os perfis de U , k e ε devem se manter inalterados; no entanto, eles podem decair artificialmente caso haja uma inconsistência entre o modelo de turbulência, as funções de parede e o perfil de entrada (RADÜNZ, 2018). A consistência implica que o cálculo de um dos campos em qualquer ponto do domínio deve resultar no mesmo valor independentemente da função utilizada. Por exemplo, se o cálculo de ε em uma célula adjacente à parede com a Eq. 3.3 resultar em $5 \text{ m}^2/\text{s}^2$, o cálculo de ε com a função de parede (Eq. 3.5) deve retornar o mesmo valor.

Para verificar o comportamento dos perfis de entrada sem a atuação de forçantes, foi simulado um terreno plano, bidimensional e com rugosidade uniforme. As condições de contorno foram as explicitadas na Seção 3.3.2. As simulações do terreno plano e uniforme empregaram apenas o esquema *upwind* para a discretização do termo divergente, e a constante C_μ foi configurada de acordo com (BELJAARS *et al.*, 1987), que recomenda o valor de 0,033 para escoamentos de CLA. O método de pós-processamento foi o descrito na Seção 3.4, sendo empregadas linhas para medir os perfis verticais de U e k na entrada, no meio, e na saída do domínio computacional, que possui 10 km de extensão e 1,5 km de altura. A Figura 4.1 ilustra os resultados desta validação



Fonte: Autor

Ao observar a Fig. 4.1, percebe-se que não houve decaimento dos perfis ao longo do domínio computacional, com o perfil de U se mantendo inalterado desde a entrada. Quanto ao perfil de k , verifica-se que não há decaimento do meio do domínio até a saída; no entanto, há uma distorção do perfil de entrada em função da formação de um pico de k próximo à superfície. Como esse fato não compromete a homogeneidade horizontal da CLA e não resulta de uma inconsistência na modelagem, mas sim da discretização do termo de produção de energia cinética turbulenta P_k (RICHARDS E NORRIS, 2011), pode-se afirmar que o modelo é consistente.

4.2 Validação do Modelo

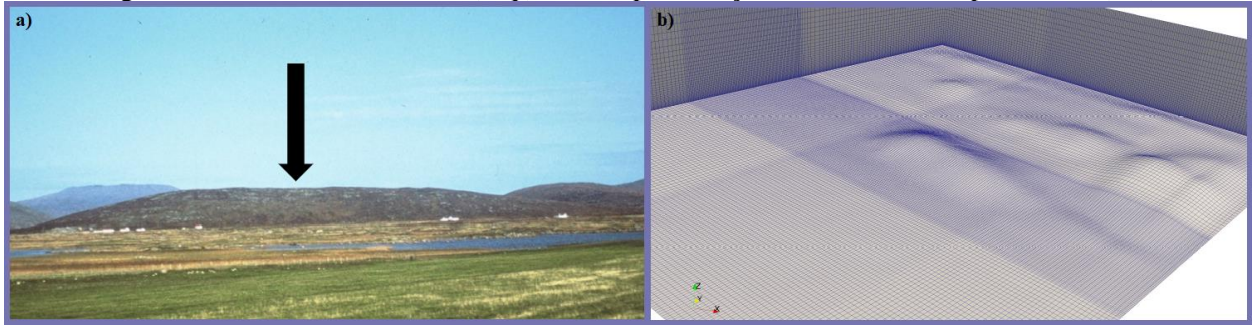
Para verificar se o modelo CFD desenvolvido neste estudo é capaz de reproduzir o comportamento não-linear de escoamentos de camada limite em terrenos complexos, os campos de U e k gerados pelas simulações foram comparados com os valores obtidos através das campanhas de medição em Askervein, descritas na Seção 4.2.1 abaixo.

4.2.1 Campanhas de Medição

Para verificar a consistência do modelo, os dados obtidos nas simulações de Askervein foram comparados com os dados meteorológicos obtidos nas campanhas de medição realizadas nesse sítio (TAYLOR e TEUNISSEN, 1987).

Askervein é uma colina localizada na Escócia, na ilha de South Uist, com coordenadas geográficas 57°11'N e 7°22'O. A colina tem formato quase elíptico quando vista de cima, com eixos de aproximadamente 1 km e 2 km orientados ao longo de uma linha NO-SE, e altura máxima de 116 m em relação ao terreno em seu entorno (AZEVEDO *et al.*, 2013). Na direção principal do vento, o terreno a montante é plano e coberto principalmente por vegetação rasteira, facilitando o emprego das condições de contorno e justificando o uso da rugosidade superficial uniforme $z_0 = 0,03$ m recomendada por (TAYLOR e TEUNISSEN, 1987).

Figura 4.2 – Foto de Askervein (esq.) e sua representação no domínio computacional (dir.)



Fonte: Retirado de (TAYLOR e TEUNISSEN, 1987) (esq.), Autor (dir.)

A campanha de medição, realizada na década de 1980, foi um dos principais estudos experimentais realizados em micrometeorologia até hoje, onde mais de 50 torres equipadas com anemômetros foram instaladas no sítio da colina. Neste estudo, foi selecionado o conjunto de dados “TU-03B”, pois nesse dia a direção principal do vento era perpendicular ao maior eixo da colina e a atmosfera encontrava-se neutra. Nesse dia, a velocidade média do vento era de 8,98 m/s, e esse valor foi utilizado como referência.

4.2.2 Parâmetros de Validação

Como o fenômeno de interesse é a variação do comportamento do vento devido à interação com topografias complexas, os parâmetros adotados foram a razão de velocidade incremental (RV) e a razão de energia cinética turbulenta incremental (RECT), onde:

$$RV = \frac{U}{U_{ref}} \quad (4.1)$$

$$RECT = \frac{k}{k_{ref}} \quad (4.2)$$

onde U e k representam os valores retornados pelas linhas de amostragem descritas na Seção 3.4, a uma certa altura, enquanto U_{ref} e k_{ref} são os valores calculados através dos perfis de entrada de U e k (Eqs 3.1-3.3) nesta mesma altura.

A comparação com os resultados experimentais foi realizada através de duas métricas: a taxa de acerto (TA) e o erro relativo (ER), pois são indicadores que refletem o quanto a simulação segue o padrão de variação do campo analisado e o quanto ela se afasta, respectivamente (RADÜNZ, 2018). A taxa de acerto é simplesmente uma função que avalia se, em um ponto, a diferença entre o valor simulado é menor que um desvio padrão ou 25% do dado medido; no caso afirmativo, ela retorna o valor 1, e no caso negativo, o valor 0. Quanto ao erro relativo, dado em percentagem, sua expressão é:

$$ER = \frac{|\phi_{simu} - \phi_{exp}|}{|\phi_{exp}|} \cdot 100 \quad (4.3)$$

onde ϕ_{simu} é o valor do campo ϕ simulado numericamente, enquanto ϕ_{exp} é o valor medido experimentalmente no mesmo ponto.

4.2.3 Constantes do Modelo de Turbulência

O modelo de turbulência $k-\varepsilon$ (Eqs. 2.9-2.13) emprega cinco constantes distintas. $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ são associadas ao transporte de ε , C_{μ} é associada à viscosidade turbulenta, e σ_k e σ_{ε} são parâmetros adimensionais que representam a razão entre a difusividade viscosa e a difusividade térmica para k e ε , respectivamente. No modelo $k-\varepsilon$ padrão, as constantes são dadas por:

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92, \quad C_{\mu} = 0,09, \quad \sigma_k = 1,00, \quad \sigma_{\varepsilon} = 1,3$$

No entanto, as constantes acima foram determinadas através de ajustes de curva para uma variedade de escoamentos em escalas típicas de engenharia, como, por exemplo, o fluxo de água em tubos industriais (LAUNDER e SPALDING, 1974). Para escoamentos de escala geofísica, como é o caso na modelagem da CLA, é comum ajustar a constante C_{μ} , o que também implica em uma alteração de σ_{ε} , a fim de satisfazer a condição imposta pela Eq. 3.4.

Neste estudo, foram avaliados três valores para C_{μ} : Padrão (*Standard*), que utiliza o valor de 0,09 proposto pelo modelo padrão; Atmosférico (*Atmospheric*), que utiliza o valor de 0,033, proposto por (BELJAARS *et al.*, 1987); e Ajustado (*Fitted*), em que o valor de C_{μ} é determinado através da Eq. 3.2, a partir de um valor de k baseado no valor médio anual, obtido através de medições. Para Askervein, esse valor foi 0,086.

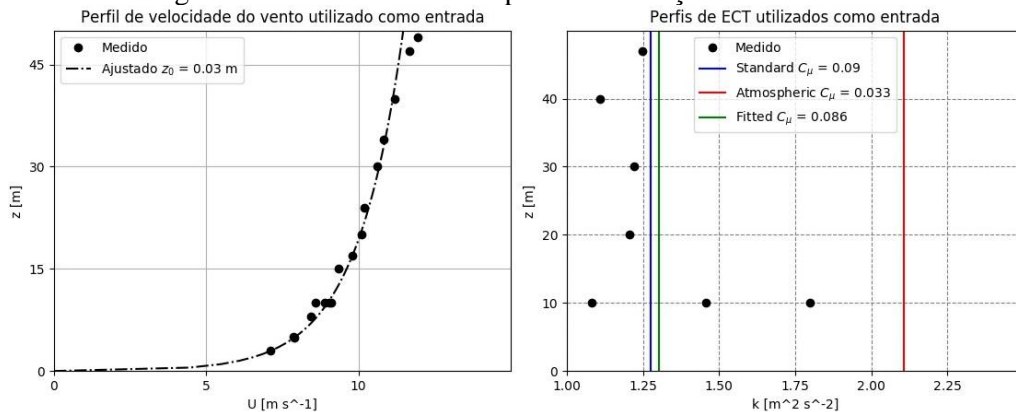
4.2.4 Análise dos Resultados

Os domínios computacionais utilizados nas simulações são os expostos na Tabela 3.1, enquanto os parâmetros dos perfis de entrada usados são definidos na Tabela 4.1, em função das constantes do modelo de turbulência. Os perfis gerados a partir destes parâmetros são apresentados na Figura 4.3, juntamente com os valores medidos experimentalmente.

Tabela 4.1 – Parâmetros de entrada para as simulações de Askervein

| Constantes | z_0 [m] | u_* [m/s] | k_{ref} [m ² /s ²] | C_{μ} | σ_{ε} |
|-------------|-----------|-------------|---|-----------|------------------------|
| Padrão | 0,03 | 0,618 | 1,27 | 0,090 | 1,300 |
| Atmosférico | 0,03 | 0,618 | 2,11 | 0,033 | 1,835 |
| Ajustado | 0,03 | 0,618 | 1,30 | 0,086 | 1,135 |

Figura 4.3 – Perfis de entrada para as simulações de Askervein

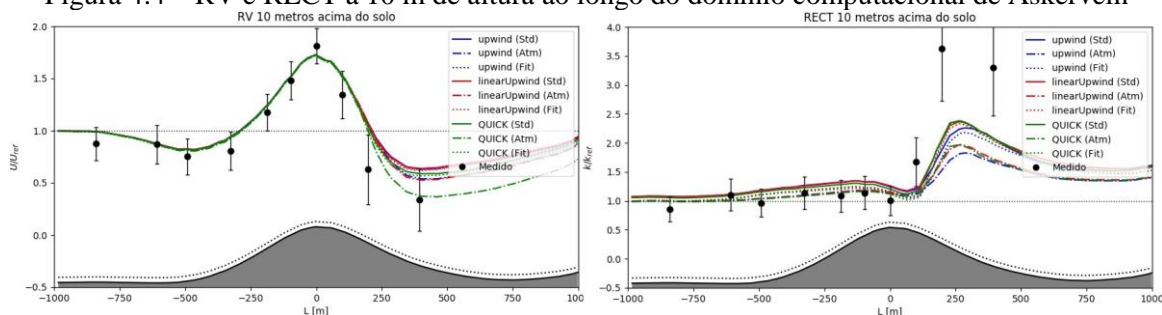


Fonte: Autor

A análise de sensibilidade do modelo ao refinamento de malha indicou uma baixa variação dos resultados do campo de velocidade; inferior à 1% entre as malhas M3 e M4. No entanto, houve um grande espalhamento dos valores de k na região do sotavento em função do nível de refinamento. Os resultados podem ser observados na Figura B1, no Apêndice B.

A seguir, são apresentados os perfis de RV e RECT ao longo do domínio computacional, em uma altura de 10 m, coincidindo com os pontos onde foram realizadas medições no conjunto de dados utilizado.

Figura 4.4 – RV e RECT a 10 m de altura ao longo do domínio computacional de Askervein

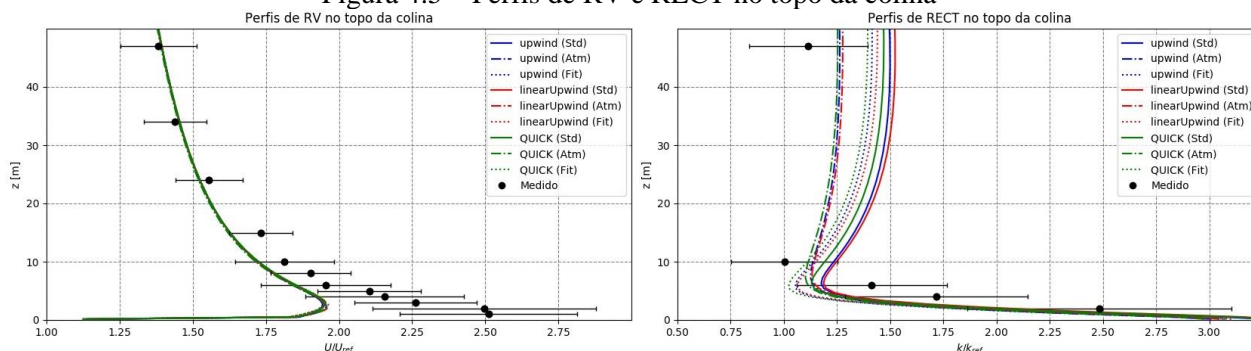


Fonte: Autor

Constata-se que o comportamento não-linear foi bem capturado pelo modelo, com ambos os perfis apresentando as variações esperadas, como a aceleração do vento no barlavento. Quanto à comparação com as medições, todas as simulações destoaram pouco dos valores reais até o ponto logo após o topo do morro, que foi o mais problemático tanto para RV como para RECT. Simulações que aplicaram os esquemas *upwind* e *linearUpwind* subestimaram a queda da RV no sotavento, porém esta foi bem representada pela simulação com o modelo Atmosférico e o esquema QUICK. Finalmente, todos os esquemas subestimaram a RECT no sotavento, no entanto, como o interesse para a análise do potencial eólico é principalmente o campo de velocidades, esses erros foram considerados de menor importância.

Além da análise ao longo do domínio computacional, também são comparados com os dados medidos os perfis verticais de RV e RECT no topo da colina (Figura 4.5). Observa-se que a medida que a altura aumenta, o perfil tende a se adequar aos valores medidos, apresentando erros muito pequenos acima de 20 m. Como os aerogeradores tendem a possuir eixos de mais de 70 m de altura, o desempenho do modelo é aceitável.

Figura 4.5 – Perfis de RV e RECT no topo da colina



Fonte: Autor

Finalmente, a Tabela 4.2 apresenta os valores da TA e do ER para as simulações com o modelo Atmosférico, considerando as medidas na altura fixa de 10 m. Uma tabela com todos os *cases* encontra-se no Apêndice B. Como os experimentos possuíam vários pontos de medição, a TA foi expressada como porcentagem dos sucessos. Por exemplo, se em 10 medições ocorreram 8 acertos, a TA é de 80%.

Tabela 4.2 – Valores de TA e ER para RV e RECT com o modelo Atmosférico para Askervein

| Modelo | TA_{RV} | ER_{RV} | $ER_{RV,MAX}$ | TA_{RECT} | ER_{RECT} | $ER_{RECT,MAX}$ |
|----------------------------------|-----------|-----------|---------------|-------------|-------------|-----------------|
| Atmosférico (<i>upwind</i>) | 90 | 19 | 71 | 70 | 19 | 57 |
| Atmosférico (<i>linUpwind</i>) | 90 | 19 | 70 | 70 | 19 | 53 |
| Atmosférico (QUICK) | 90 | 13 | 58 | 70 | 18 | 52 |

4.3 Estudo de Caso

Para o estudo de caso, a região no município de Herval definida na seção 3.2, foram executadas quatro simulações, baseadas nos domínios computacionais descritos na Tabela 3.1. As condições de contorno foram as descritas na subseção 3.3.2, e os perfis de entrada possuem forma similar à apresentada na Figura 4.3, sendo confeccionados a partir das Eqs. 3.1-3.3 e com os parâmetros apresentados na Tabela 4.3. Essa tabela ainda traz o tempo total, t_{simu} , e o número de iterações, N_{iter} , para cada simulação.

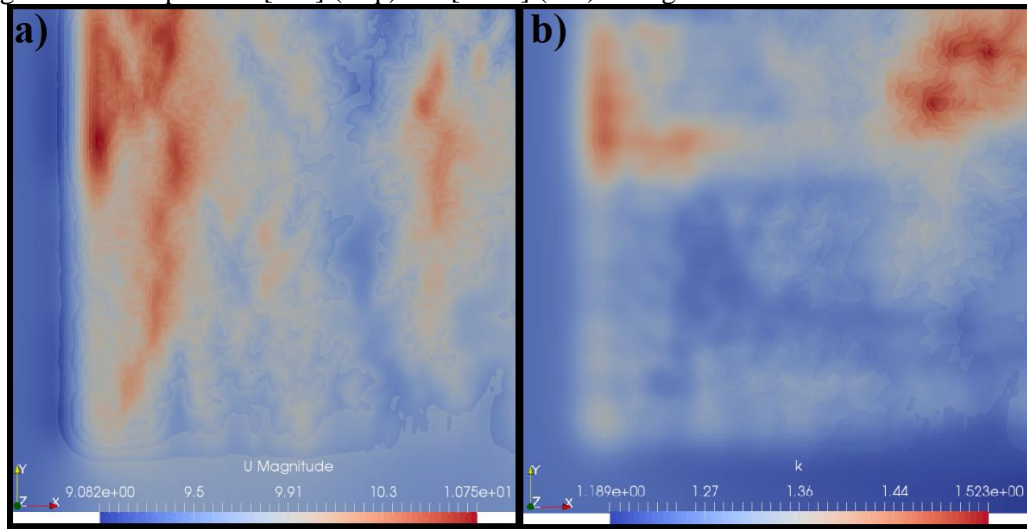
Tabela 4.3 – Parâmetros das simulações realizadas no terreno de interesse

| Case | Malha | z_0 [m] | u_* [m/s] | k_{ref} [m ² /s ²] | C_μ | σ_ϵ | t_{simu} [h] | N_{iter} | t_{iter} [s] |
|------|-------|-----------|-------------|---|---------|-------------------|----------------|------------|----------------|
| 1 | M1 | 0,1 | 0,475 | 1,241 | 0,033 | 1,928 | 3,37 | 1366 | 8,88 |
| 2 | M2 | 0,1 | 0,475 | 1,241 | 0,033 | 1,928 | 1,35 | 277 | 17,57 |
| 3 | M3 | 0,1 | 0,475 | 1,241 | 0,033 | 1,928 | 6,05 | 320 | 68,08 |
| 4 | M4 | 0,1 | 0,475 | 1,241 | 0,033 | 1,928 | 5,13 | 198 | 93,28 |

Percebe-se que t_{simu} e N_{iter} são menores no segundo *case*, embora a malha utilizada seja mais refinada. Isso ocorre pois as simulações aplicaram a funcionalidade *mapFields* do OpenFOAM, configurada no arquivo *mapFieldsDict* do diretório *system*, que permite utilizar os resultados de uma simulação anterior como condições iniciais para a simulação atual. Assim, os resultados do primeiro *case* foram carregados no segundo *case*, e assim sucessivamente. Portanto, para avaliar o recurso computacional requerido por cada simulação, é introduzido o tempo de iteração t_{iter} , definido como a razão entre t_{simu} e N_{iter} .

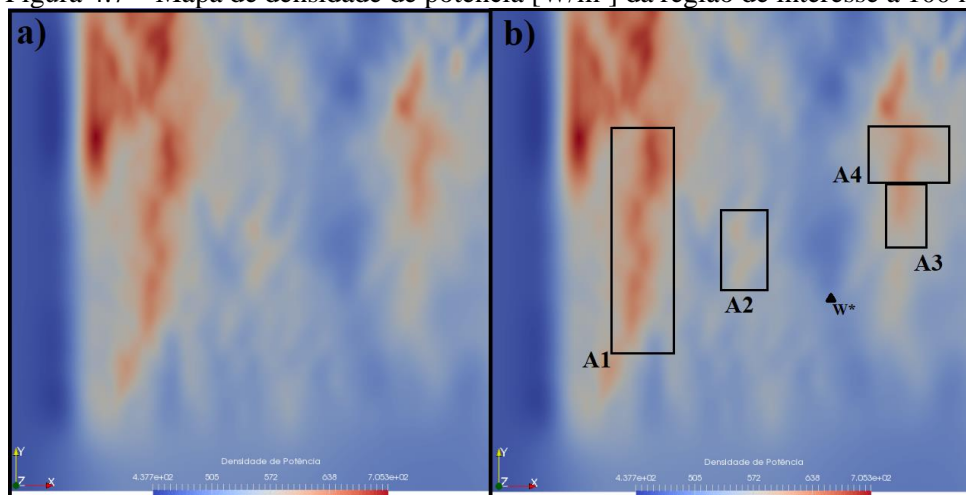
Após a convergência das simulações, o domínio computacional é aberto no *Paraview*, e são gerados os mapas de \bar{U} e de k na altura de 100 m, apresentados na Figura 4.6, e de densidade de potência, apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.6 – Mapa de \bar{U} [m/s] (esq.) e k [m²/s²] (dir.) da região de interesse a 100 m de altura



Fonte: Autor

O processo de *micrositing* começa pela escolha das posições com maior densidade de potência disponível para os aerogeradores, que correspondem às zonas de maior velocidade média, localizadas onde o efeito de bloqueio causado pela topografia resulta na aceleração dos ventos. Para o caso estudado, é decidido alocar um total de 20 aerogeradores no terreno de interesse, e as regiões escolhidas são as indicadas como A1, A2 e A3 na Figura 4.7b, por possuírem alto potencial eólico e estarem distantes o suficiente das fronteiras. Embora apresente potencial eólico elevado, a região A4 não é escolhida devido à maior intensidade de turbulência, como pode ser observado na Figura 4.6b, pois uma elevada intensidade de turbulência é associada a esforços aerodinâmicos nas pás dos aerogeradores e pode comprometer a vida útil destes (DIMITROV, 2017). O ponto W* representa o ponto de baixo potencial eólico no terreno, e é analisado para fins de comparação com o ponto de maior potencial.

Figura 4.7 – Mapa de densidade de potência [W/m^2] da região de interesse a 100 m

Fonte: Autor

Após a escolha das regiões, os 20 aerogeradores são situados manualmente, obedecendo as restrições de distância mínima de cursos d'água e entre geradores, sendo adotado o critério de pelo menos $3D$ de distância entre os mesmos na direção perpendicular ao vento predominante, onde D é o diâmetro da área varrida pelas pás do modelo (ZHANG, 2015). Para determinar D , assim como a altura do eixo, é necessário escolher um modelo. Considerando que houve um acréscimo entre 19% e 28% na velocidade a 100 m em relação ao perfil de entrada nas regiões escolhidas, a velocidade média nesses locais fica entre 9,6 m/s e 10,4 m/s. Dessa forma, julga-se que um modelo adequado de aerogerador para o parque eólico é o apresentado na Figura 2.5, em função de sua curva de potência.

O modelo escolhido possui $D = 82$ m e um altura de eixo de 108 m. Com essas informações é possível alocar os aerogeradores nas regiões escolhidas, e os dados de velocidade média na altura do eixo dos mesmos são extraídos. A partir das velocidades médias, são calculados valores de C , o parâmetro de escala de Weibull, através da Eq. 2.16. Finalmente, as Eqs. 2.15 e 2.17 são utilizadas em conjunto para determinar a potência média gerada por um aerogerador no período de um ano, onde as classes de velocidade são todos os valores discretos entre 2 m/s (velocidade de *cut-in*) e 25 m/s (velocidade de *cut-out*). A Tabela 4.4 traz os parâmetros calculados para dois aerogeradores de referência, W1 e W*, que representam o aerogerador instalado no ponto de maior potencial eólico e um aerogerador hipotético instalado em um ponto de baixo potencial eólico, respectivamente, sendo X e Y as posições em coordenadas UTM e RV a razão de velocidade incremental do vento na posição do eixo. Os parâmetros de todos os 20 geradores são apresentados no Apêndice C.

Tabela 4.4 – Parâmetros dos aerogeradores alocados

| Aerogerador | X | Y | Z _{BASE} [m] | Z _{HUB} [m] | \bar{U} [m/s] | RV | C [m/s] | EAG [MWh] |
|-------------|--------|---------|-----------------------|----------------------|-----------------|------|-----------|-----------|
| W1 | 258742 | 6440860 | 219 | 327 | 10,34 | 1,28 | 11,65 | 11398,45 |
| W* | 262287 | 6439040 | 90 | 198 | 7,92 | 0,98 | 8,93 | 7907,60 |

Da tabela acima, percebe-se uma diferença de velocidade média de 23,4% entre os dois aerogeradores, assim como uma diferença de EAG de 30,6%. Esses resultados são coerentes com os obtidos por (RADÜNZ, 2018) e com valores de velocidade incremental do vento apresentados por (MATTUELLA, 2012). A EAG média dos aerogeradores é de 10884,56 MWh, e a EAG total do parque é **217691,10 MWh**.

Assim como nas simulações de Askervein, foi realizada uma análise de sensibilidade ao refinamento da malha no estudo de caso. Os parâmetros utilizados para a comparação entre as malhas foram os valores de \bar{U} e k nos eixos dos aerogeradores alocados, e os resultados demonstraram um comportamento assintótico e convergente entre as malhas M3 e M4, com diferenças relativas inferiores a 0,1% e 1% para todos os valores de \bar{U} e k , respectivamente. Esses resultados, juntamente com aqueles apresentados no Apêndice B, indicam que, no modelo desenvolvido, a sensibilidade dos resultados ao refinamento da malha diminui com a altura analisada.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, propôs-se um modelo numérico para reproduzir os efeitos da topografia nos ventos da parte inferior da Camada Limite Atmosférica (CLA), que foi utilizado para realizar um estudo de avaliação do potencial eólico em uma região de terreno complexo. Para tal, empregou-se um pacote de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) de código aberto, o OpenFOAM, que disponibiliza *solvers* adequados para simular escoamentos atmosféricos de meso e microescala com o auxílio de modelos de turbulência. Verificou-se que o modelo de turbulência $k-\varepsilon$, da forma que é empregado no pacote, é capaz de reproduzir uma atmosfera horizontalmente homogênea desde que os perfis de entrada do vento e as funções de parede utilizadas sejam consistentes entre si.

O desempenho do modelo foi testado em domínios computacionais que representam uma colina real, e os resultados foram comparados com os dados obtidos em campanhas de medição no local onde a colina se situa. Nessas simulações, foram variados dois parâmetros: as constantes do modelo de turbulência e o esquema de discretização do termo divergente, a fim de determinar a configuração mais adequada para o modelo. Os resultados apresentaram um efeito de redução da velocidade média do vento na região do sotavento devido à turbulência, juntamente com o efeito de aceleração do vento no barlavento, que representam características não-lineares dos escoamentos de CLA, justificando o uso de modelos baseados em CFD no lugar de modelos lineares convencionais para esses casos. Além disso, foi constatado que as constantes do modelo Atmosférico e o esquema de divergência QUICK apresentaram perfis de velocidade do vento mais de acordo com os dados medidos.

A metodologia de *micrositing* desenvolvida no estudo também foi realizada utilizando apenas dados de livre acesso e softwares livres de geoprocessamento, QGIS e GRASS GIS. O uso desses programas, juntamente com a ferramenta *terrainBlockMesher*, mostrou-se capaz de gerar malhas estruturadas de alta qualidade para aplicações de engenharia de ventos, partindo inicialmente apenas de um arquivo *raster* com o MDE da região. Para a seleção da região de interesse, é utilizado o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, e uma região no município de Herval, com coordenadas geográficas 32°9'18''S e 53°31'44''O, é escolhida através de uma análise baseada nos mapas disponibilizados pelo Atlas, que apresentam os dados relevantes para a prospecção de um parque eólico. As principais características desejadas foram uma velocidade média alta, uma direção de ventos predominante, fator de forma de Weibull alto, assim como uma topografia complexa, para justificar o uso do modelo CFD. Os resultados indicaram que a presença do relevo complexo causa uma mudança de mais de 20% na velocidade média prevista em certos locais, assim como variações de até 30% na energia anual gerada para um mesmo modelo de aerogerador situado em diferentes regiões do terreno. A alocação de 20 aerogeradores resulta em uma energia anula gerada (EAG) média de 10884,56 MWh, e a EAG total do parque calculada é 217691,10 MWh.

No entanto, além das hipóteses empregadas pelo modelo, como a neutralidade da atmosfera, duas principais lacunas podem ser identificadas na metodologia de *micrositing* apresentada: o tratamento uniforme da rugosidade superficial, assim como a confecção dos perfis de entrada baseada apenas nos dados de referência do Atlas Eólico. Em análises reais de aproveitamento eólico, é necessário instalar ao menos uma torre anemométrica na região, e obter dados reais de velocidade e direção de vento ao longo de um ano. No entanto, a metodologia desenvolvida pode ser adaptada para uma situação real, sendo os dados fornecidos pela torre anemométrica tratados na etapa de pré-processamento e utilizados para confeccionar os perfis de entrada e obter os parâmetros da distribuição de Weibull.

Apesar disto, o estudo foi capaz de desenvolver um modelo adequado para a simulação de escoamentos de CLA em terrenos complexos e apresentar uma discussão detalhada sobre o efeito da topografia em análises de aproveitamento eólico, o que, juntamente com o uso de recursos computacionais de código aberto e com a transparência da metodologia, foi realizado com o intuito de promover a reprodutibilidade e o desenvolvimento contínuo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

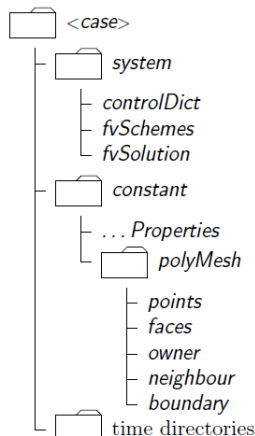
- ABEEOLICA, **Associação Brasileira de Energia Eólica.**, 2019[Online] Disponível em: <http://tiny.cc/ABEEOLICA> [Acessado em abril de 2019].
- ANACONDA, INC., **Anaconda Distribution.** <https://www.anaconda.com/download/#linux>, 2018
- ARYA, P. S., **Introduction to Micrometeorology.** Academic Press, 2001.
- AZEVEDO, J. M. S.; CASTRO, F. A. S. F.; & COSTA, J. C. P. L., **Development of procedures for the simulation of atmospheric flows over complex terrain, using OpenFOAM.** 2013. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica.
- BALOGH, M.; PARENTE, A.; & BENOCCHI, C., RANS Simulation of ABL flow over complex terrains applying an Enhanced k- ϵ model and wall function formulation: Implementation and comparison for Fluent and OpenFOAM. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 104-106, p. 360-368, 2012.
- BELJAARS, A. C. M.; WALMSLEY, J. L.; TAYLOR, P. A., A mixed spectral finite-difference model for neutrally stratified boundary-layer flow over roughness changes and topography. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 38, p. 273-303, 1987.
- BETZ, A., Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust. Mit einem Zusatz von L. Prandtl, **Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse**, vol. , p. 193-217, 1919.
- BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E., **Wind Energy Handbook.** John Wiley & Sons, 2011.
- CAFIRESCI, **California Fire Science Consortium**, 2019[Online] Disponível em: <http://www.cafiresci.org/> [Acessado em junho de 2019].
- DE CONINCK, H. A. REVI, M. BABIKER, P. BERTOLDI, M. BUCKERIDGE, A. CARTWRIGHT, W. DONG, J. FORD, S. FUSS, J.-C. HOURCADE, D. LEY, R. MECHLER, P. NEWMAN, A. REVOKATOVA, S. SCHULTZ, L. STEG, & T. SUGIYAMA, **Strengthening and Implementing the Global Response. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**, 2018 [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- DIMITROV, N.; NATARAJAN, A.; & MANN, J., Effects of normal and extreme turbulence spectral parameters on wind turbine loads. **Renewable Energy**, v. 101, p. 1180-1193, 2017.
- ESTANQUEIRO, A.; SIMÕES, T., A new methodology for urban wind resource assessment. **Renewable Energy**, v. 89, p. 598-605, 2016.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J., **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** John Wiley & Sons, 2012.
- HARDIN, E., **Simulating Wind Over Terrain: How to Build an OpenFOAM Case from GRASS GIS Digital Elevation Models.**, 2013[Online] Disponível em: <https://tinyurl.com/yyxujhca> [Acessado em junho de 2019].
- IEA, **International Energy Agency: Renewable Energy.**, 2018[Online] Disponível em: <https://www.iea.org/topics/renewables/> [Acessado em abril de 2019].

- JACKSON, P. S.; HUNT, J. C. R., Turbulent wind flow over a low hill. **Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society**, v. 101, p. 929-955, 1975.
- KOBLITZ, T.; SØRENSEN, N. N.; BECHMANN, A.; & SOGACHEV, A. **CFD Modeling of Non-Neutral Atmospheric Boundary Layer Conditions**. (2013). DTU Wind Energy. (DTU Wind Energy PhD; No. 0019(EN)).
- LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B., The numerical computation of turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 3, p. 269-289, 1974.
- LEONARD, N. P., Order of accuracy of QUICK and related convection-diffusion schemes. **Applied Mathematical Modelling**, v. 19, 1995.
- MATTUELLA, J. M. L., **Avaliação em túnel de vento do comportamento da camada limite atmosférica em terrenos complexos**. 2012. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia da UFRGS.
- OPENFOAM FOUNDATION, **OpenFOAM User Guide – Version 6**. [Online] Disponível em: <https://openfoam.org>, 2018 [Acessado em abril 2019].
- PATANKAR, S. V., **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. McGraw-Hill, 1980.
- PETRY, A. P., **Análise numérica de escoamentos turbulentos tridimensionais empregando o método de elementos finitos e simulação de grandes escalas**. 2002. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia da UFRGS.
- POPE, S. B., **Turbulent Flows**. Cambridge University Press, 1ª edição, 2000.
- RADÜNZ, W. C., **Metodologia de micro-siting para terrenos complexos baseada em CFD com softwares livres de código aberto**. 2018. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
- RICHARDS, P. J.; HOXEY, R., Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 47, p. 145-153, 1993.
- RICHARDS, P. J.; NORRIS, S.E., Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 99, p. 257-266, 2011.
- SCHMIDT, J.; PERALTA, C.; STOEVE SANDT, B., **Automated generation of structured meshes for wind energy applications**, 2012, Open Source CFD International Conference.
- SCHUBERT, C.; ELETROSUL, **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul 2014**, 2014.
- SEGERSSON, D.: **A tutorial to urban wind flow using OpenFOAM**. In Proceedings of CFD with OpenSource Software, 2017, Edited by Nilsson. H., http://dx.doi.org/10.1796/OS_CFD#YEAR_2017.
- STRATARIDAKIS, C.; WHITE, B. R.; GREIS, A., Turbulence Measurements for Wind-Turbine Siting on a Complex Terrain. 1998. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- STULL, R. B., **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Kilwer Academic Publishers, 1988.
- TAYLOR, P.; TEUNISSEN, H., The Askervein hill project: overview and background data. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 39, p. 15-39, 1987.
- ZHANG, M., **Wind resource assessment and micro-siting: science and engineering**. Wiley, Singapura, 1ª edição, 2015.

APÊNDICE A – Estrutura de uma Simulação no OpenFOAM

O OpenFOAM não possui uma interface gráfica, sendo melhor definido como um conjunto de *solvers* programados em C++ que são operados através da interface de linha de comandos *Bash* do Linux. Portanto, para executar os *solvers*, as simulações são configuradas através de arquivos de texto (*dictionaries*) que contém dados em formatos específicos. Além disso, os arquivos precisam estar alocados em diretórios apropriados, e este conjunto de arquivos e diretórios configura a estrutura de um *case* do OpenFOAM, ilustrado na Figura A e detalhado abaixo.

Figura A – Estrutura de um *case* do OpenFOAM.



Fonte: Retirado de (OPENFOAM FOUNDATION, 2018)

- O Diretório *system*

É onde são configurados os parâmetros referentes ao processo de solução. Ele contém pelo menos os seguintes 3 dicionários: *controlDict*, onde são definidos não só os parâmetros relacionados ao tempo de simulação (*time step*, *startTime/endTime*, extração e registro de dados ao longo da simulação) como também o *solver*; *fvSchemes*, onde são configurados os esquemas de discretização; e *fvSolution*, onde são definidos os *solvers* algébricos e a tolerância para cada variável, assim como os parâmetros de relaxação e, para o algoritmo SIMPLE, os critérios de convergência e o número de correções de não-ortogonalidade.

- O Diretório *constant*

É o diretório que contém a descrição completa da malha do *case*, no subdiretório *polyMesh*, e os dicionários que especificam as propriedades físicas do *case*. Neste estudo, são necessários 2 dicionários: *transportProperties*, que, neste caso, define apenas a viscosidade μ do fluido; e *turbulenceProperties*, que define o modelo de turbulência utilizado e suas configurações.

- Os *time directories*

São os diretórios que contém arquivos com os dados dos campos calculados (ex: velocidade e pressão) em uma determinada iteração ou *time step*. Durante o pré-processamento, o único diretório é o “0”, e é nele que são definidas as condições de contorno e as condições iniciais. Nesse diretório, encontram-se arquivos de texto editáveis para cada variável do problema (Nas simulações deste estudo: U , k , ε , μ_t), e nesses arquivos são configuradas as condições de contorno, que devem ser atribuídas para cada *patch* (“região”) definida no domínio computacional.

Na prática, o uso dos tutoriais disponíveis como base para simulações é prática comum no uso do OpenFOAM, pois estes já têm o formato de *case* adequado para serem lidos pelo programa. Além disso, os tutoriais são bastante variados, contemplando problemas comuns de engenharia, e normalmente já utilizam configurações adequadas para simular problemas similares.

APÊNDICE B – Dados das Simulações de Askervein

Tabela B – Valores de TA e ER para RV e RECT com o modelo Atmosférico para Askervein

| Case | TA_{RV} | ER_{RV} | $ER_{RV,MAX}$ | TA_{RECT} | ER_{RECT} | $ER_{RECT,MAX}$ |
|---------------------------|-----------|-----------|---------------|-------------|-------------|-----------------|
| <i>upwind</i> (Std) | 90 | 22 | 89 | 60 | 23 | 48 |
| <i>upwind</i> (Atm) | 90 | 19 | 71 | 70 | 19 | 57 |
| <i>upwind</i> (Fit) | 90 | 22 | 86 | 70 | 20 | 51 |
| <i>linearUpwind</i> (Std) | 80 | 22 | 90 | 50 | 22 | 43 |
| <i>linearUpwind</i> (Atm) | 90 | 19 | 70 | 70 | 19 | 53 |
| <i>linearUpwind</i> (Fit) | 90 | 21 | 84 | 70 | 19 | 46 |
| QUICK (Std) | 90 | 20 | 75 | 70 | 21 | 43 |
| QUICK (Atm) | 90 | 13 | 58 | 70 | 18 | 52 |
| QUICK (Fit) | 90 | 19 | 69 | 70 | 18 | 44 |

As Figuras B1 e B2 apresentam os perfis de RV e RECT na altura de 10 m ao longo do domínio computacional e no topo da colina, respectivamente, para os diferentes níveis de refinamento de malha apresentados na Tabela 2.1. Todas essas simulações empregaram o esquema *upwind*, pois verificou-se que o uso de esquemas de ordem superior tende a promover ainda mais a convergência dos valores obtidos entre os diferentes níveis de refinamento.

Figura B1 – RV e RECT a 10 m de altura ao longo do domínio computacional de Askervein.

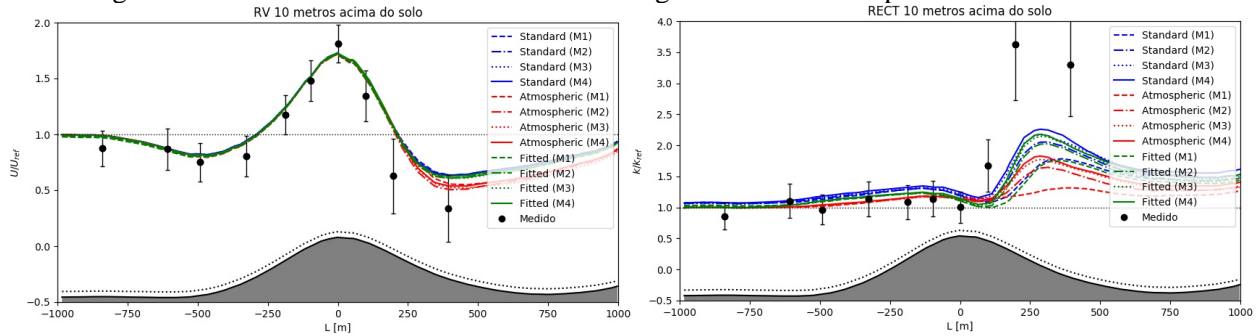
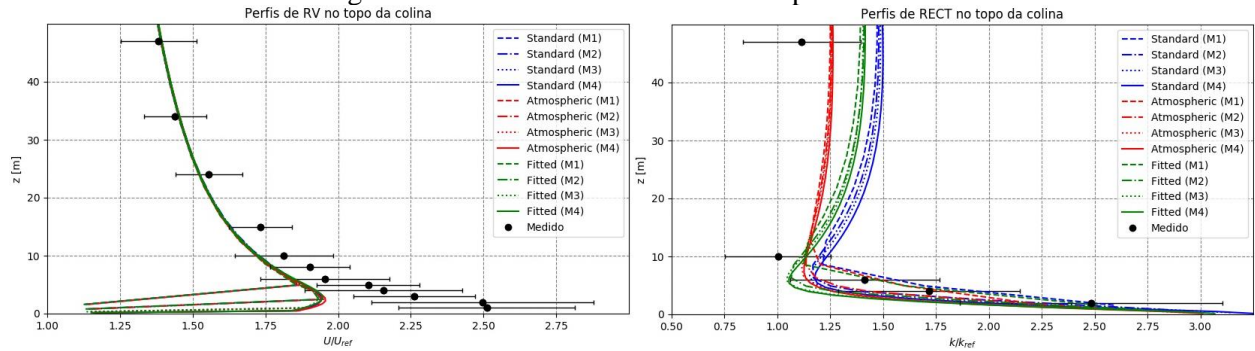


Figura B2 – Perfis de RV e RECT no topo da colina.



APÊNDICE C – Parâmetros dos Aerogeradores

Tabela C – Parâmetros dos aerogeradores

| Aerogerador | X | Y | Z _{BASE} [m] | Z _{HUB} [m] | \bar{U} [m/s] | RV | C [m/s] | EAG [MWh] |
|-------------|--------|---------|-----------------------|----------------------|-----------------|------|---------|-----------|
| W1 | 258742 | 6440860 | 219 | 327 | 10,34 | 1,28 | 11,65 | 11398,45 |
| W2 | 258789 | 6440614 | 218 | 326 | 10,31 | 1,27 | 11,62 | 11364,53 |
| W3 | 258756 | 6440368 | 219 | 327 | 10,23 | 1,26 | 11,53 | 11272,92 |
| W4 | 258701 | 6440122 | 213 | 321 | 10,12 | 1,25 | 11,40 | 11144,19 |
| W5 | 258455 | 6439876 | 213 | 321 | 10,14 | 1,25 | 11,42 | 11167,84 |
| W6 | 258381 | 6439630 | 199 | 307 | 10,08 | 1,25 | 11,36 | 11096,59 |
| W7 | 258388 | 6439384 | 195 | 303 | 10,03 | 1,24 | 11,30 | 11036,50 |
| W8 | 258389 | 6439134 | 191 | 299 | 9,93 | 1,23 | 11,19 | 10914,34 |
| W9 | 258553 | 6438892 | 188 | 296 | 10,00 | 1,24 | 11,27 | 11000,13 |
| W10 | 258603 | 6438646 | 197 | 305 | 10,02 | 1,24 | 11,29 | 11024,40 |
| W11 | 258459 | 6438400 | 194 | 302 | 9,93 | 1,23 | 11,19 | 10914,34 |
| W12 | 260516 | 6439400 | 184 | 292 | 9,60 | 1,17 | 10,82 | 10492,50 |
| W13 | 260521 | 6439154 | 190 | 298 | 9,66 | 1,19 | 10,89 | 10571,33 |
| W14 | 260530 | 6438410 | 161 | 269 | 9,54 | 1,18 | 10,75 | 10412,72 |
| W15 | 264037 | 6441220 | 183 | 291 | 9,71 | 1,20 | 10,94 | 10636,30 |
| W16 | 264060 | 6440974 | 173 | 281 | 9,70 | 1,20 | 10,93 | 10623,36 |
| W17 | 263960 | 6440728 | 172 | 280 | 9,70 | 1,20 | 10,93 | 10623,36 |
| W18 | 263873 | 6440482 | 176 | 284 | 9,82 | 1,21 | 11,07 | 10776,92 |
| W19 | 263912 | 6440236 | 173 | 281 | 9,73 | 1,20 | 10,97 | 10662,11 |
| W20 | 263912 | 6439990 | 168 | 276 | 9,65 | 1,19 | 10,88 | 10558,26 |