

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

INVESTIGAÇÃO DO ESCOAMENTO DE AR NA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA EM
UM TERRENO COMPLEXO ATRAVÉS DE CFD

por

Arthur Tonietto Lovato

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

Porto Alegre, Novembro de 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Tonietto Lovato, Arthur
INVESTIGAÇÃO DO ESCOAMENTO DE AR NA CAMADA LIMITE
ATMOSFÉRICA EM UM TERRENO COMPLEXO ATRAVÉS DE CFD /
Arthur Tonietto Lovato. -- 2020.
25 f.
Orientadora: Adriane Prisco Petry.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2020.

1. Energia eólica. 2. Terrenos complexo. I. Prisco
Petry, Adriane, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Arthur Tonietto Lovato

INVESTIGAÇÃO DO ESCOAMENTO DE AR NA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA EM
UM TERRENO COMPLEXO ATRAVÉS DE CFD

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

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Escolher uma das áreas de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof^ª. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Guilherme Henrique Fiorot

Prof^ª. Thamy Hayashi

Porto Alegre, Novembro de 2020

AGRADECIMENTOS

A minha família, por me fazer acreditar em mim mesmo todos os dias.

Aos meus amigos, por todas as acaloradas discussões sobre o sentido da vida, que ajudaram a tornar esse momento mais leve.

A todos os colegas da engenharia, com quem vivi momentos de aprendizado durante a graduação.
Por fim, a todos aqueles que me auxiliaram na realização desse trabalho.

Tonietto Lovato, Arthur. **Investigação do Escoamento de Ar na Camada Limite Atmosférica em um Terreno Complexo através de CFD**. 2020. 25p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

RESUMO

O trabalho consiste na simulação do escoamento de ar em um terreno de topografia complexa, empregando o *software* de CFD Fluent. A região escolhida para realização das simulações é Askervein, na Escócia, devido à grande quantidade de dados experimentais e trabalhos realizados sobre o local. São utilizados modelos de turbulência baseados na solução das equações de energia cinética turbulenta (k) e de sua taxa de dissipação (ϵ). Os resultados obtidos indicam que os modelos são precisos em representar o comportamento do escoamento na região do barlavento do morro, porém, devido à grande sensibilidade à turbulência na região do sotavento, os modelos superestimam os valores de velocidade e subestimam a quantidade de energia cinética turbulenta. Por fim, verifica-se que os resultados obtidos estão em linha com os apresentados em outros estudos sobre a influência da topografia no comportamento do escoamento de ar.

Palavras-chave: Terrenos complexos, energia eólica, vento, Fluent, camada limite atmosférica.

Tonietto Lovato, Arthur. **Investigation of Air Flow at the Atmospheric Limit Layer on a Complex Terrain Through CDF**. 2020. 25p. Mechanical Engineering End Of course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

ABSTRACT

The present work consists of using the commercial package ANSYS Fluent to carry out simulations of air flow in a complex topography. The region chosen for the simulations is the Askervein hill, in Scotland, due to the large amount of experimental data and work carried out on the site. Two-equation turbulence models based on the solution of the turbulent kinetic energy (k) and its dissipation rate (ϵ) are used. The results obtained indicate that the models are accurate in representing the flow behavior in the windward region of the hill, however, due to the great sensitivity to turbulence in the leeward region, the models overestimate the speed values and underestimate the amount of turbulent kinetic energy. Finally, it appears that the results obtained are similar with those presented in other studies about the influence of topography on the behavior of air flow.

Keywords: Complex terrain, Wind energy, Fluent, Atmospheric boundary layer.

NOMENCLATURA

Símbolos

A_f	Área da face da célula analisada [m ²]
$C_{\varepsilon 1}$	Constante do modelo $k-\varepsilon$ [adimensional]
$C_{\varepsilon 2}$	Constante do modelo $k-\varepsilon$ [adimensional]
C_{μ}	Constante do modelo $k-\varepsilon$ [adimensional]
k	Energia cinética turbulenta [m ² /s ²]
k_{ref}	Energia cinética turbulenta para o perfil de entrada [m ² /s ²]
p	Pressão instantânea [Pa]
p_0	Pressão de referência [Pa]
P_k	Produção de energia cinética turbulenta por cisalhamento [W/m ³]
Re	Número de Reynolds [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]
u	Velocidade instantânea [m/s]
\bar{u}	Velocidade média de curto-prazo [m/s]
u'	Flutuação de velocidade [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]
z	Altura [m]
z_0	Comprimento de rugosidade aerodinâmica da superfície [m]
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta [m ² /s ³]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
φ	Campo genérico [unidade variável]
φ_f	Valor de φ na face da célula analisada [unidade variável]
κ	Constante de von Kármán [adimensional]
μ	Viscosidade dinâmica [N s/m]
μ_t	Viscosidade dinâmica turbulenta [N s/m]
σ_k	Número de Prandtl de k [adimensional]
σ_{ε}	Número de Prandtl de ε [adimensional]
τ	Coefficiente de difusão da equação de transporte de φ [unidade variável]

Abreviaturas e acrônimos

AABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CLA	Camada Limite Atmosférica
EAG	Energia anual gerada
ER	Erro relativo
IEA	<i>International Energy Association</i>
RECT	Razão de energia cinética turbulenta incremental
RNG	<i>Renormalization Group Theory</i>

RV
TA

Razão de velocidade incremental
Taxa de acerto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	1
2.1. Vento	1
2.2. Camada limite atmosférica (CLA)	2
2.2.3 Perfil de velocidade.....	2
2.3. Equações governantes.....	2
2.4. Turbulência.....	3
2.5. Modelagem da turbulência	4
2.5.1 Standard $k-\varepsilon$	5
2.5.2 RNG $k-\varepsilon$	6
2.5.3 Realizable $k-\varepsilon$	6
3. METODOLOGIA E MODELAGEM.....	7
3.1. Metodologia numérica.....	7
3.2. Seleção da região	7
3.3. Domínio computacional	9
3.4. Condições de contorno	9
3.5. Especificações do modelo de turbulência.....	10
3.6. Esquemas de discretização	11
4. RESULTADOS.....	12
4.1. Parâmetros de validação	12
4.2. Análise dos resultados	12
5. CONCLUSÃO	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de suprir o aumento da demanda de energia elétrica exige de cada país uma constante expansão estrutural a fim de ampliar sua capacidade de geração. Fatores como desenvolvimento econômico, avanços tecnológicos e crescimento populacional influenciam diretamente no comportamento da demanda de energia, tornando sua projeção, principalmente em um horizonte de médio e longo prazo, um exercício de extrema complexidade (IEA, 2019).

Nesse cenário, fontes renováveis vêm tomando um importante papel. Segundo a *International Energy Association* (IEA), as fontes renováveis apresentaram a maior taxa de crescimento, no ano de 2019, entre as fontes de energia elétrica, fazendo com que sua participação no suprimento global de energia atingisse 27%, maior valor na história. Esse crescimento acelerado se deve em grande parte à energia eólica, que teve representatividade de um terço no mesmo.

No cenário brasileiro, a energia eólica também foi importante no ano de 2019, quando atingiu a marca de 2ª maior fonte de energia do país, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (AABEEólica, 2020).

Na implementação de um parque eólico, é essencial um estudo de viabilidade técnica e econômica, pois irá mostrar quanto tempo é necessário para que o investimento feito no projeto retorne para os investidores. Esse estudo passa diretamente por uma análise da região em que o mesmo será inserido, na qual a determinação correta do potencial eólico se faz essencial, pois determina qual será a energia anual gerada (EAG). A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é amplamente utilizada para determinação da EAG, por meio da aplicação de métodos numéricos para simulação do comportamento e desenvolvimento de escoamentos de vento em terrenos de geometria complexa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente trabalho aborda a simulação do escoamento de ar em um terreno complexo. Dessa maneira, se faz conveniente a definição detalhada dos conceitos de vento, camada limite atmosférica e terreno complexo, pois serão utilizados diretamente no estudo. Essa seção tem como objetivo abordar esses assuntos, visando a contextualização e a facilitação da compreensão.

2.1. Vento

O vento, definido como a fluência do ar atmosférico que nos circunda, é causado, em sua maior parte, pela rotação da Terra (efeito Coriolis) e pelos gradientes horizontais de pressão oriundos do aquecimento solar não-uniforme da superfície da Terra (ZHANG, 2015).

No sentido vertical, a atmosfera terrestre é segmentada em diversas camadas. A termosfera, a mais externa, situa-se aproximadamente a 85 km acima da superfície, enquanto a Troposfera é a mais próxima da superfície. Com extensão vertical de 11 km, esta camada possui uma porção inferior, designada camada limite atmosférica (CLA), na qual ocorrem as correntes de ar que justificam estudos de aproveitamento eólico.

No sentido horizontal, também a atmosfera terrestre é dividida em diferentes escalas, que variam desde a dimensão do planeta até milímetros, ao longo das quais ocorre transferência de energia. Dependendo da escala, certos fenômenos são mais dominantes na dinâmica atmosférica.

A maior escala é a sinótica, na qual prevalecem a circulação global e os ciclones extratropicais. (ZHANG, 2015). Nas escalas meso e micro, os fenômenos de maior relevância são efeito da topografia e dos fluxos turbulentos próximos à superfície, entre outros. A avaliação de

potencial eólico, a partir do estudo dos ventos, dá maior relevância aos fenômenos de meso e microescala, devido à maior proximidade à escala dos parques eólicos (ZHANG, 2015).

2.2. Camada limite atmosférica (CLA)

No início do século XX, Prandtl introduziu o conceito de camada limite, percebendo que, em escoamentos externos, há uma região próxima à fronteira sólida que impõe uma condição de não-deslizamento em que o fluido viscoso sofre desaceleração devido ao atrito com a superfície. Desse modo, a camada limite fica denominada como a região próxima à fronteira sólida, na qual deve-se considerar o efeito de viscosidade do fluido (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2000).

A camada limite atmosférica, zona que se estende entre 100 e 3000 m acima do nível da superfície, é definida como a parte da troposfera que sofre influência direta da superfície terrestre e responde às suas forçantes em escalas de tempo de até uma hora. Essas forçantes são: atrito, evapotranspiração, radiação, emissão de poluentes e a topografia. (STULL, 1988).

2.2.3 Perfil de Velocidade

Uma das principais maneiras de expressar o perfil de velocidades do vento dentro da camada limite atmosférica é através da lei logarítmica:

$$U(z) = \frac{U^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.1)$$

em que $U(z)$ é a velocidade do vento, em m/s na altura z , κ é a constante de von Kármán (com valor 0,4) (VECINA, 2017) e z_0 é o comprimento da rugosidade no local. Segundo Vecina (2017), o perfil logarítmico apresenta um bom ajuste próximo à superfície, porém se torna insuficiente para região superior da CLA.

2.3. Equações Governantes

O escoamento de ar na camada limite atmosférica pode ser representado matematicamente através da equação de conservação de massa (Eq. 2.2) e pela equação de transporte de uma grandeza genérica φ (Eq. 2.3).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \varphi) = \tau \nabla^2 \varphi + S_\varphi \quad (2.3)$$

Sendo ρ a massa específica [kg/m³], u a velocidade [m/s], t o tempo [s] e τ um coeficiente de difusão, cuja unidade depende de φ .

Os termos da Eq. 2.3 são interpretadas conforme descrito abaixo:

- $\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}$

Representa como φ está variando em relação ao tempo dentro do volume de controle.

- $\nabla \cdot (\rho \vec{u} \varphi)$

Representa como φ está sendo transportado pelo campo de velocidades advectivamente.

- $\tau \nabla^2 \varphi$

Representa a difusividade de φ , como a grandeza é transportada pelo seu próprio gradiente.

- S_φ

É o termo que traz as taxas de geração volumétrica de φ , podendo assumir valores negativos (sumidouros), ou positivos (fontes).

Assumindo que o escoamento é incompressível, da conservação de massa chega-se na Eq. 2.4:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.4)$$

Combinando a Eq. (2.3), para φ sendo a quantidade de movimento, com a Eq. (2.4), o resultado é a Eq. (2.5):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \left[-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \right] \quad (2.5)$$

Na qual p representa a pressão em Pa, μ é a viscosidade dinâmica [N s/m²] e S_M é a fonte de quantidade de movimento, representando forças externas como o efeito Coriolis e a gravidade.

2.4. Turbulência

Um escoamento turbulento é aquele no qual as partículas do fluido se misturam rapidamente enquanto se movimentam ao longo do escoamento, devido a flutuações no campo de velocidades. A turbulência ocorre quando as forças viscosas no fluido não são capazes de conter flutuações aleatórias no movimento do fluido, tornando o escoamento caótico. Assim, pode-se caracterizar o movimento como turbulento quando sua inércia é muito superior à sua viscosidade. A relação entre essas duas variáveis pode ser avaliada através de um parâmetro adimensional, chamado número de Reynolds (Re). Valores elevados do número de Reynolds caracterizam o escoamento turbulento e são causados por elevada velocidade, elevado comprimento característico, baixa viscosidade ou combinações desses fatores (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2000).

Grande parte dos escoamentos de interesse das ciências e engenharias apresentam comportamento altamente turbulento, de modo que os que ocorrem na camada limite atmosférica não diferem desses.

O comportamento caótico e transiente apresentado por escoamentos turbulentos faz com que o transporte de quantidade de movimento, calor e massa sejam potencializados, de maneira que acontecem com maior eficácia, em diversas ordens de grandeza, em relação à difusão molecular (STULL, 1988).

A turbulência também pode ser vista como uma sobreposição de estruturas rotacionais, denominadas vórtices, de diferentes escalas. Os vórtices de maior escala possuem comprimento e velocidade na mesma ordem de grandeza do escoamento, de modo que seu número de Reynolds será elevado, fazendo com que os efeitos de viscosidade sejam pequenos suficientes para serem

negligenciados. Richardson (1922 *apud* POPE, 2000) apresentou a cascata de energia, modelo que considera que os maiores vórtices se alimentam da energia cinética do escoamento, porém, devido à sua instabilidade, se quebram, transferindo energia para os de escala média. De maneira similar, esses vórtices continuam a se quebrar, transferindo a energia para vórtices cada vez menores, até que o número de Reynolds seja suficientemente pequeno para que o vórtice seja estável, momento em que a viscosidade molecular será eficiente na dissipação de energia cinética. Richardson (1922 *apud* POPE, 2000, 183) resumiu com seus belos versos:

*“Big whorls have little whorls,
Which feed on their velocity;
And little whorls have lesser whorls,
And so on to viscosity (in the molecular sense)”*

2.5. Modelagem da Turbulência

Apesar das características dos escoamentos turbulentos, eles são descritos pelas equações de Navier-Stokes (Eq. 2.5). O problema a ser enfrentado é que a Eq. (2.5) possui solução exata para um número limitado, e pequeno, de casos de escoamentos simples, fazendo-se necessária a utilização de métodos numéricos, que geralmente estão associados a custos computacionais elevados, na análise de problemas reais. Com isso, modelos de turbulência são utilizados nas simulações de escoamentos como alternativa a ter que resolver numericamente todas as escalas do problema (DUMONT, 2019).

Em problemas práticos de escoamentos turbulentos na camada limite atmosférica, modelos baseados na decomposição de Reynolds são os mais comumente utilizados. Esses modelos avaliam as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia considerando um regime permanente “médio”, ou seja, considerando a média em intervalos de tempo grandes o suficiente para que a turbulência seja estudada (PETRY, 2002).

A decomposição de Reynolds divide a velocidade em duas componentes:

- \bar{u}_i é a média e independe do tempo;
- u'_i é a flutuação instantânea em torno da média.

De modo que $u_i = \bar{u}_i + u'_i$.

A decomposição de Reynolds aplica-se, de maneira análoga, ao campo de pressão.

Substituindo os valores das variáveis pela média mais sua flutuação na equação de Navier-Stokes, obtém-se a equação de Reynolds (equação de Navier-Stokes para média de Reynolds), ou RANS (Eq. 2.6).

$$\rho u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2.6)$$

Nesse processo surge um termo extra na equação, $-\rho \overline{u'_i u'_j}$, conhecido como tensor de Reynolds, que representa o efeito das flutuações turbulentas. Essa nova variável causa o problema de fechamento, visto que o número de incógnitas é maior que o número de equações no problema (DUMONT, 2019). Para solucionar o problema de fechamento, faz-se necessário empregar um modelo de turbulência, através da adição de informações empíricas, calculadas por aproximações estatísticas semi-empíricas (PETRY, 2002).

Pela metodologia RANS, existem diversos métodos utilizados para tratar o problema de fechamento, que podem ser classificados através das características do seu equacionamento, enumerados por Costa (2018) da seguinte maneira:

1. Modelos de zero equação (algébricos);
2. Modelos de uma equação: utiliza um comprimento de escala característico e resolve uma equação de transporte, geralmente para energia cinética turbulenta;
3. Modelos de duas equações: duas equações de transporte de propriedades turbulentas são utilizadas. Sendo a equação da energia cinética turbulenta em conjunto com a equação da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ou com a equação da frequência de passagem de grandes estruturas turbulentas. Nessa classificação, estão os modelos $k-\varepsilon$ e $k-\omega$;
4. Modelos algébricos para o tensor de Reynolds: equações algébricas são utilizadas de modo a estabelecer relação entre as tensões turbulentas e as componentes médias de velocidade;
5. Modelos para o tensor de Reynolds: obtêm o fechamento completo do sistema de equações através da utilização de equações de transporte explícitas para calcular as seis componentes do tensor de Reynolds, em conjunto com equações de transporte complementares para equação da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta e equação da frequência de passagem de grandes estruturas turbulentas.

Este trabalho irá focar nas formas de aplicação do modelo $k-\varepsilon$ implementadas no pacote *Ansys Fluent*

2.5.1 Standard $k-\varepsilon$

O modelo $k-\varepsilon$ padrão realiza a modelagem utilizando as equações da energia cinética turbulenta (k) e de sua taxa de dissipação (ε). Por se tratar de um modelo robusto, econômico e relativamente preciso, se tornou uma ferramenta poderosa para problemas práticos de engenharia envolvendo fluxos turbulentos (ANSYS, 2016).

Esse modelo foi desenvolvido para aplicações com elevado número de Reynolds e a condição de escoamento totalmente turbulento é imposta, além disso, os efeitos da viscosidade molecular são desprezados.

O modelo apresenta dependência da viscosidade turbulenta μ_t (Eq. 2.7):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

Onde os termos da equação são:

- C_μ é uma constante adimensional;
- k é a energia cinética turbulenta [m^2/s^2];
- ε é a taxa de dissipação da turbulência [m^2/s^3].

Assim, a viscosidade μ , na Eq. (2.6), é a soma da viscosidade turbulenta μ_t com a viscosidade do fluido.

A energia cinética turbulenta é metade da soma dos quadrados das componentes flutuantes da velocidade nas direções x , y e z .

No modelo $k-\varepsilon$, a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação de turbulência são calculadas através das Eq. (2.8) e Eq. (2.9).

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (2.8)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon}{k} P_k - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2}{k} \quad (2.9)$$

Onde os termos novos que aparecem nas equações são:

- σ_ε : número de Prandtl de ε (adimensional);
- σ_k : número de Prandtl de κ (adimensional);
- $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$: constantes adimensionais;
- P_k : produção de energia cinética turbulenta por cisalhamento [W/m³].

Para resolver o problema de fechamento, relaciona-se P_k com a taxa de deformação do escoamento médio (Eq. 2.10), utilizando a hipótese de Boussinesq (DUMONT, 2019).

$$P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.10)$$

Por se tratar de um modelo já conhecido, as vantagens e desvantagens de sua utilização são bem identificadas, de modo que modificações foram propostas para aumentar sua performance. O *software* comercial ANSYS *Fluent* oferece duas modificações: RNG k- ε e *realizable* k- ε (ANSYS, 2016).

2.5.2 RNG k- ε

O modelo RNG k- ε foi desenvolvido através da técnica estatística *Renormalization Group Theory* e possui as mesmas equações de transporte para geração e dissipação da turbulência. A principal diferença para o modelo padrão se encontra na substituição da constante $C_{\varepsilon 1}$ por uma função, chamada $C_{\varepsilon 1RNG}$.

De acordo com o Guia Teórico do ANSYS *Fluent* (2016), o modelo k- ε RNG é mais preciso e confiável para uma quantidade maior de escoamentos que o k- ε padrão, por incluir as seguintes melhorias:

- Adição de um termo extra na equação de ε aumenta a precisão do modelo RNG para escoamentos rápidos e retilíneos;
- Inclui o efeito de vórtices na turbulência, melhorando os resultados para escoamentos centrífugos;
- Cálculo dos números de Prandtl turbulentos é feita de maneira analítica, diferentemente do padrão, que utiliza valores constantes;
- Calcula o efeito da viscosidade através de uma fórmula diferencial derivada analiticamente, o que se mostra de grande importância para baixos números de Reynolds.

2.5.3 Realizable κ - ε

Esse modelo alternativo satisfaz certas restrições matemáticas relacionadas com os tensores de Reynolds, de maneira coerente com a física dos escoamentos turbulentos, que não são satisfeitas

no modelo padrão nem no RNG. Por esse motivo, é chamado pela expressão “*realizable*” (ANSYS, 2016).

O modelo *realizable* k- ϵ , proposto por Shih *et al.* (1995), traz duas principais mudanças para corrigir as deficiências do modelo original:

- Utiliza um equacionamento alternativo para o cálculo da viscosidade turbulenta, considerando C_μ variável;
- Assume um novo equacionamento para o transporte da taxa de dissipação da turbulência, ϵ , derivada da equação da dinâmica da flutuação quadrática média da vorticidade.

Tanto o RNG κ - ϵ quanto o *realizable* k- ϵ tem mostrado comportamento superior em relação ao modelo padrão. Entretanto, por se tratar de um modelo relativamente novo, ainda não está claro em quais situações o *realizable* k- ϵ pode performar melhor que o RNG k- ϵ (ANSYS, 2016).

3. METODOLOGIA E MODELAGEM

A presente seção traz informações referentes aos modelos numéricos utilizados no estudo, assim como as metodologias empregadas para realização das simulações no *Fluent*. Além disso, são apresentadas as informações referentes ao caso estudado.

3.1. Metodologia Numérica

O *software* comercial de CFD ANSYS *Fluent* foi utilizado na simulação numérica da região de interesse, a fim de calcular a intensidade de turbulência e velocidade, que são comparados com as medições realizadas no local.

O *software* aplica um modelo de turbulência para resolver as equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds, as equações de balanço de momento e conservação de massa.

3.2. Seleção da Região

Askervein, uma colina situada na Escócia, na ilha de South Uist, apresenta coordenadas geográficas 57°11'N e 7°22'O e formato elíptico, em vista plana. O menor e o maior eixos de orientação NO-SE medem 1 km e 2 km, respectivamente, com altura máxima de 116 m em relação ao terreno adjacente e 126 m em relação ao nível do mar. “O declive suave e a sua localização relativamente isolada com uma topografia plana de 3 - 4 km em direção à costa, colocam Askervein na beira de ser classificado como um terreno complexo” (AZEVEDO *et al.*, 2013). O terreno a montante, na direção principal do vento, possui cobertura de vegetação rasteira, o que facilita o emprego das condições de contorno e justifica o uso da rugosidade superficial uniforme $z_0 = 0,03$ m recomendada por (TAYLOR; TEUNISSEN, 1985).

Um dos experimentos mais relevantes em escala atmosférica, realizado em micro meteorologia, ocorreu na década de 80 e é conhecido como projeto *Askervein hill*. Sua rica fonte de dados tem sido amplamente utilizada para validação de modelos numéricos de escoamento do vento (CASTRO *et al.*, 2003; CRASTO, 2007; DUMONT, 2019).

Mais de 50 torres equipadas com anemômetros de copos ou sônicos foram instaladas nas adjacências de Askervein, com o objetivo de, nos meses de setembro e outubro de 1983, coletar informações relativas à velocidade média e direção do vento, intensidades turbulentas, entre outras, na presença do morro mostrado na Figura 3.1.

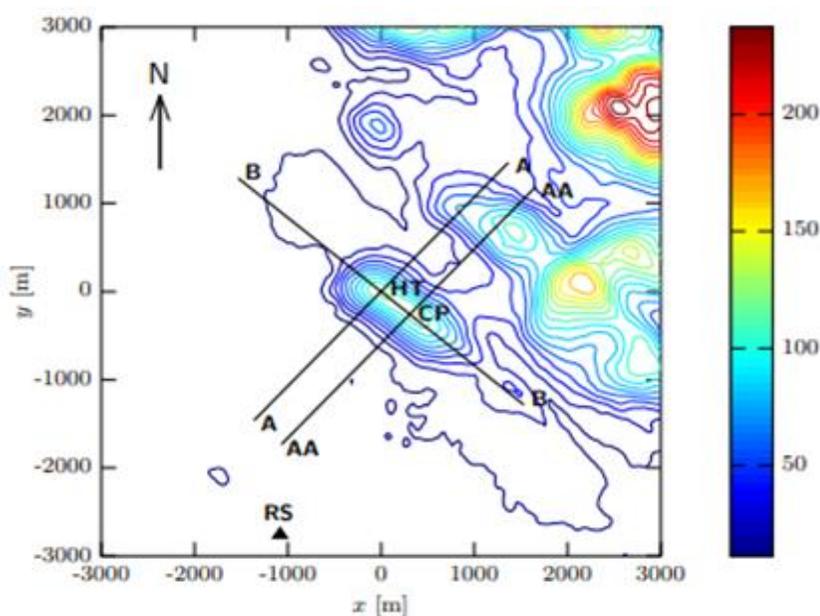
Figura 3.1 – Foto de Askervein



Fonte: TAYLOR; TEUNISSEN, 1987.

A maioria dos mastros de medição estavam localizados ao longo das linhas A – A e AA – AA, orientados 47° do Norte e cruzando a colina nas posições HT (topo da colina) e CP (ponto central), respectivamente. Além disso, os dados também foram coletados no RS (local de referência), um ponto de medição onde o vento pode ser considerado não perturbado, localizado a aproximadamente 3 km do eixo principal do morro na direção SSW, como pode ser visto na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Mapa topográfico de Askervein centrado em HT.



Fonte: AZEVEDO *et al*, 2013.

Foi selecionado o conjunto de dados “TU-03B”, considerando que a direção principal do vento era perpendicular ao maior eixo da colina e a atmosfera apresentava-se neutra. A velocidade

média do vento naquele dia, de 8,98 m/s, representou o valor utilizado como referência. A cobertura do solo no momento da campanha de medição de campo era principalmente grama, urze e algumas rochas planas, fazendo Taylor e Teunissen (1985) sugerirem um valor uniforme de $z_0 = 0,03$ m para comprimento de rugosidade aerodinâmica em toda a superfície do terreno.

3.3. Domínio Computacional

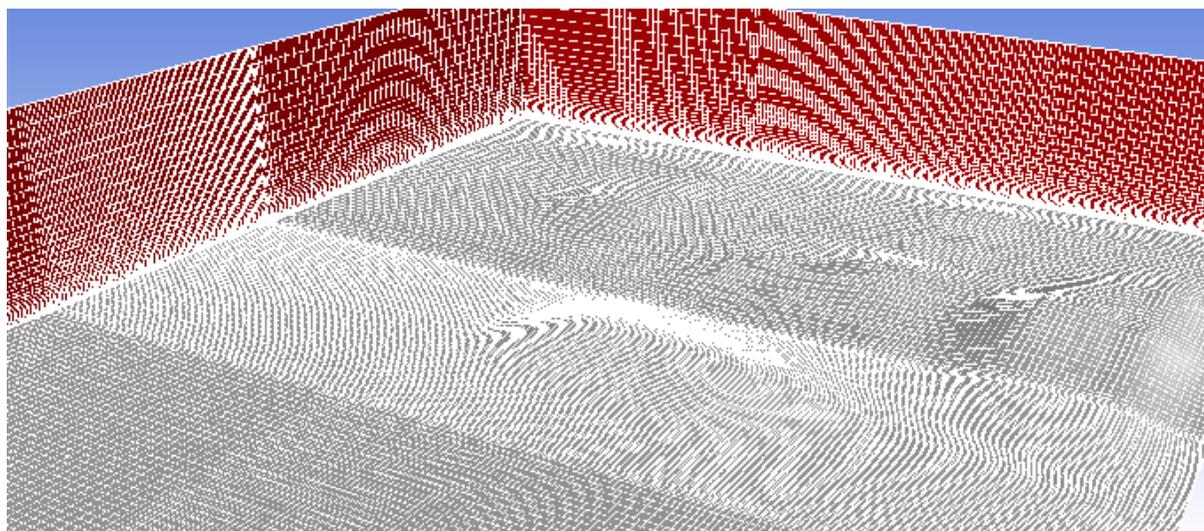
A geração do domínio computacional é feita através do seguinte processo:

1. Obtenção de um modelo digital de elevação (MDE);
2. Manipulação do MDE para recortar a região de interesse;
3. Conversão das coordenadas geográficas para coordenadas UTM;
4. Transformação do MDE para uma superfície 3D em formato .stl;
5. Discretização através de um gerador de malhas estruturado para terrenos.

O domínio computacional possui dimensões, em quilômetros, de 6x5x1,5 e foi dividido em um total de 5.713.200 volumes. Como o interesse do trabalho é na região inferior da CLA, a altura do domínio tem mais de 1km, de modo a não influenciar os resultados na região superficial.

A Figura 3.3 mostra a representação computacional da região estudada.

Figura 3.3 – Representação do domínio de cálculo



3.4. Condições de Contorno

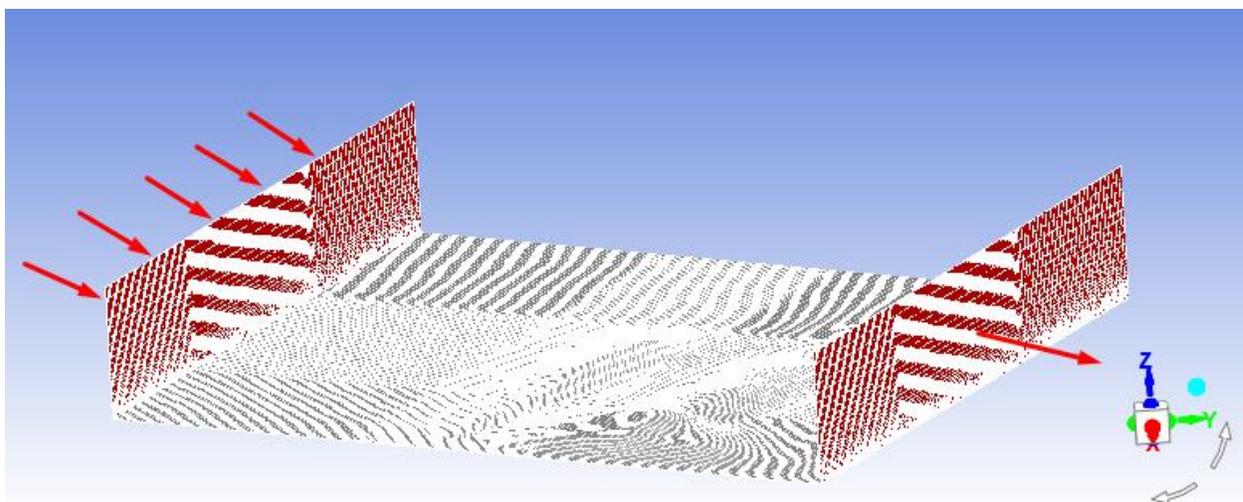
Para o caso estudado, a direção predominante do vento é de oeste para leste, assim, a região de entrada é a fronteira oeste do domínio computacional e a de saída a fronteira oposta (leste). Os demais lados (topo, norte e sul) são definidos pela condição de simetria, na qual os gradientes perpendiculares à superfície são nulos. Por fim, no solo é utilizada a condição de não-deslizamento. A Tabela 3.1 apresenta as condições de contorno utilizadas em cada região do domínio computacional, descritas acima.

Tabela 3.1 – Condições de contorno utilizadas no caso estudado.

Região	Condição de Contorno
Norte (<i>north</i>)	<i>Symmetry</i>
Leste (<i>east</i>)	<i>Pressure-outlet</i>
Sul (<i>south</i>)	<i>Symmetry</i>
Oeste (<i>west</i>)	<i>Velocity-inlet</i>
Topo (<i>top</i>)	<i>Symmetry</i>
Chão (<i>ground</i>)	<i>Wall</i>

A Figura 3.4 ilustra a explicação acima, mostrando as regiões de entrada e saída do escoamento.

Figura 3.4 – Representação das regiões de entrada e saída no domínio de cálculo



3.5. Especificações do Modelo de Turbulência

Os modelos de turbulência utilizados no presente trabalho fazem o uso de até cinco constantes adimensionais:

- σ_k (representa a difusividade viscosa para k)
 - *Standard k- ϵ*
 - *Realizable k- ϵ*
- σ_ϵ (representa a difusividade térmica para ϵ)
 - *Standard k- ϵ*
 - *Realizable k- ϵ*
- C_μ (associado à viscosidade turbulenta)
 - *Standard k- ϵ*
 - *RNG k- ϵ*
- $C_{\epsilon 1}$ (associada ao transporte de ϵ)
 - *Standard k- ϵ*
 - *RNG k- ϵ*
- $C_{\epsilon 2}$ (associada ao transporte de ϵ)

- *Standard* k-ε
- RNG k-ε
- *Realizable* k-ε

Para o modelo *Standard* k-ε, os valores padrão das constantes, adotados pelo *software*, foram determinados de maneira experimental, para uma gama de escoamentos tipicamente turbulentos, de modo que funcionam de maneira satisfatória para diferentes tipos de escoamento (ANSYS, 2016).

No modelo RNG k-ε, o valor das constantes é determinado de maneira analítica pela teoria do grupo de renormalização (RNG).

Por fim, para o *Realizable* k-ε, as constantes são determinadas de modo a garantir a performance do modelo (ANSYS, 2016).

A Tabela 3.2 apresenta os valores utilizados para as constantes dos modelos de turbulência.

Tabela 3.2 – Constantes dos modelos de turbulência

Modelo	C_μ	σ_ϵ	σ_k	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$
<i>Standard</i> k-ε	0,090	1,300	1,000	1,440	1,920
RNG k-ε	0,084	-	-	1,420	1,680
<i>Realizable</i> k-ε	-	1,200	1,000	-	1,900

3.6. Esquemas de Discretização

O método de solução utilizado pelo ANSYS *Fluent* consiste em integrar a equação de transporte em cada volume de controle, de modo a converter em uma equação algébrica, que expressa a lei de conservação dentro do volume específico e que pode ser resolvida numericamente (ANSYS, 2016).

A Eq. 3.1 representa a conservação da grandeza φ , para um regime permanente, escrita na forma integral para um volume de controle V .

$$\oint \rho \varphi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\varphi \nabla \varphi d\vec{A} + \int_V S_\varphi dV \quad (3.1)$$

Resolvendo a Eq. 3.1, chega-se na Eq. 3.2, que será resolvida em cada volume de controle.

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \varphi \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\varphi \nabla \varphi_f \cdot \vec{A}_f + S_\varphi V \quad (3.2)$$

Na Eq. (3.2) N_{faces} é o número de faces da célula, φ_f valor de φ na face f , $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ é o fluxo de massa na face, \vec{A}_f é a área da face, $\nabla \varphi_f$ o gradiente de φ na face e V o volume da célula.

Por padrão, o *Fluent* guarda os valores discretos da grandeza φ no centro do volume de controle. Porém, na Eq. (3.2) o valor φ é requisitado, de modo que um método de interpolação deve ser aplicado. Neste trabalho, isso é feito através do esquema *upwind*, que utiliza as grandezas da célula a jusante, em relação à direção normal da velocidade, para o cálculo de φ_f . (ANSYS, 2016).

O pacote comercial utilizado na realização desse trabalho oferece diferentes esquemas de discretização: *first-order upwind*, *second-order upwind*, *power law*, e QUICK. Nas simulações realizadas em Askervein, foi utilizado o esquema *upwind* de segunda ordem.

4. RESULTADOS

A presente seção traz uma análise dos resultados obtidos ao serem empregadas as especificações apresentadas no capítulo anterior na simulação do escoamento de vento na região de interesse.

4.1. Parâmetros de Validação

Nesse estudo, a interação com a topografia complexa é a principal causadora de variação no comportamento do vento. Desse modo, é o fenômeno que apresenta maior interesse em ser medido. Assim, adotam-se dois parâmetros:

- Razão de velocidade incremental (RV)

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

- Razão de energia cinética turbulenta incremental (RECT)

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

Os parâmetros com subíndice “ref” são valores de referência na entrada, enquanto U e k representam os valores retornados na linha de interesse.

Para que seja feita a comparação das medições com os resultados experimentais, são adotados o erro relativo (ER) e a taxa de acerto (TA), que, de acordo com Dumont (2019), mostram o quanto a simulação segue ou se afasta do padrão de variação do campo analisado.

O erro relativo é calculado de acordo com a Eq. 4.3:

$$ER = \frac{|f_{simulado} - f_{experimental}|}{|f_{experimental}|} \cdot 100 \quad (4.3)$$

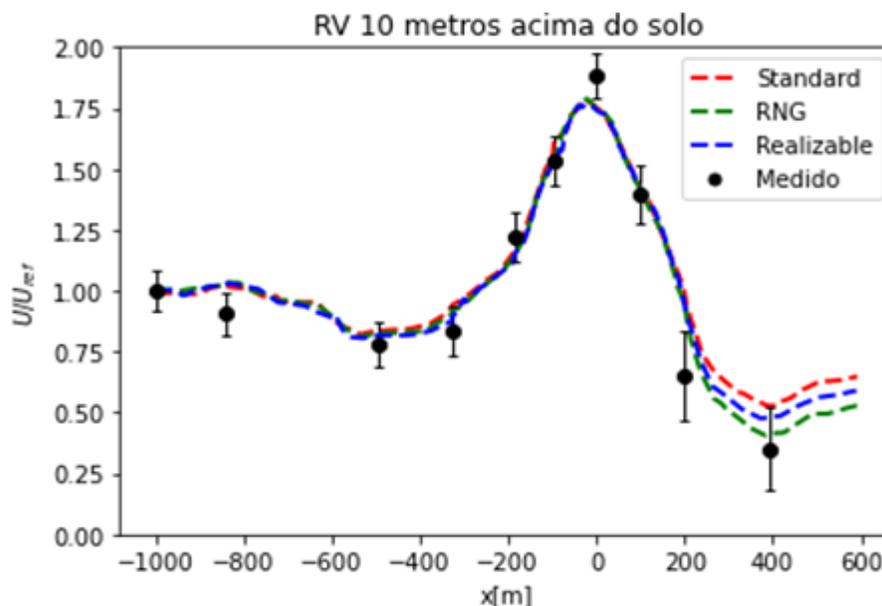
Já a taxa de acerto será dada por uma função de Heaviside, que retorna 1 quando a diferença entre o valor simulado e o dado medido é menor que um desvio padrão ou 25% do dado medido, ou 0 quando essa diferença for maior.

4.2. Análise dos Resultados

Os resultados calculados foram comparados com os obtidos na campanha de medição e com os apresentados em trabalhos anteriores (CASTRO *et al*, 2003; CRASTO, 2007; DUMONT, 2019).

A Figura 4.1 apresenta a comparação dos valores encontrados para o incremento de velocidade horizontal ao longo da linha A, em uma altura de 10m do solo, juntamente com os valores reportados por (TAYLOR; TEUNISSEN, 1985).

Figura 4.1 – RV a 10m de altura ao longo da linha A

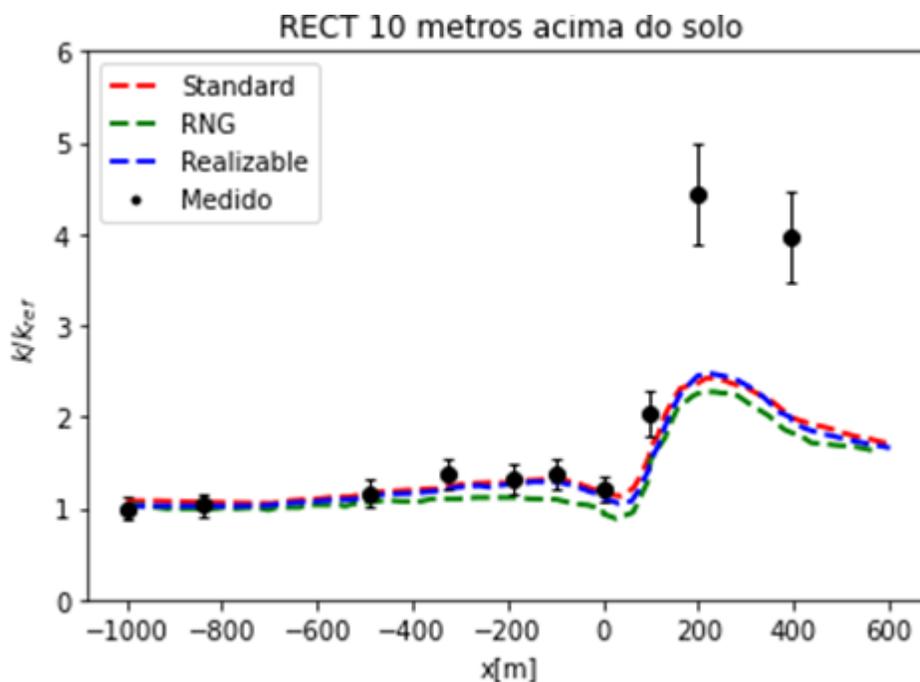


Em relação aos dados experimentais, é possível notar que os três modelos previram de maneira similar e satisfatória o comportamento do escoamento na região do barlavento, porém foi subestimado o pico de velocidade no topo do morro. Na região do sotavento, onde o escoamento apresenta maior sensibilidade em relação a modelagem da turbulência, o modelo RNG foi o que apresentou os resultados mais próximos as medições.

Esses resultados encontram-se em linha com os apresentados em estudos similares (CASTRO *et al*, 2003; CRASTO, 2007; DUMONT, 2019). Castro *et al* (2003) explicam que a velocidade no topo do morro tende a ser subestimada devido à rugosidade do terreno, que é mais suave nessa região.

Os resultados de turbulência são apresentados na Figura 4.2, que apresenta, juntamente com os dados medidos experimentalmente ao longo da linha A, os valores encontrados pelos modelos de turbulência.

Figura 4.2 – RECT a 10 m de altura ao longo da linha A.



De maneira similar aos resultados de velocidade do vento, vê-se que os modelos fazem uma previsão bastante semelhante entre si dos dados medidos na região do barlavento e no topo do morro, porém falham em prever os valores da energia cinética turbulenta no sotavento. Todos os modelos subestimaram os valores de k após o topo do morro, mas o modelo que apresentou maior discrepância dos experimentais de k na região do sotavento foi o RNG k - ϵ .

Por fim, a Tabela 4.1 apresenta os valores da taxa de acerto (TA) e erro relativo (ER) em relação ao incremento da velocidade e da energia cinética turbulenta para os três modelos empregados. Como os experimentos possuem diversos pontos de medição, TA é calculada pela soma do valor da função em cada ponto, dividido pelo número de pontos em que foi testada.

Tabela 4.1 – Valores de TA e ER para RV e RECT

Modelo	TA _{RV}	ER _{RV}	ER _{RV,MAX}	TA _{RECT}	ER _{RECT}	ER _{RECT,MAX}
<i>Standard</i> k - ϵ	80	15	55	70	14	50
RNG k - ϵ	80	11	47	70	22	54
<i>Realizable</i> k - ϵ	80	12	46	70	15	50

5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, foi utilizado um *software* comercial de CFD para reproduzir numericamente o comportamento do vento em um terreno de topografia complexa. A região escolhida para a utilização dos modelos computacionais foi Askervein, na Escócia, devido à grande quantidade de dados experimentais e trabalhos realizados sobre local. O modelo de turbulência utilizado foi o k - ϵ , que realiza a modelagem das equações da energia cinética turbulenta (k) e de sua taxa de dissipação (ϵ). As simulações realizadas do domínio computacional utilizaram além do modelo k - ϵ

padrão duas variações: RNG e *realizable*, com valores padrão da literatura para as constantes empregadas nos modelos.

O comportamento do vento representado pelos modelos apresenta as variações esperadas para o tipo de problema estudado. Como é possível ver na Figura 4.1, os três modelos preveem um aumento de velocidade na região do barlavento e um decaimento após o topo do morro, devido aos efeitos da turbulência. Desse modo, é possível concluir que o comportamento não-linear do problema foi bem capturado pelos modelos, o que justifica a utilização de CFD na análise desse tipo de escoamento.

Em comparação com os valores apresentados na campanha de medição, os três modelos utilizados apresentaram resultados bastante similares para velocidade do vento e energia cinética turbulenta na região do barlavento, entretanto falharam em prever o comportamento do escoamento após o topo do morro. Isso pode ter ocorrido devido à sensibilidade do escoamento a modelagem matemática na região do sotavento, onde ocorrem os maiores valores de turbulência.

Concluindo, fica claro que o *software* comercial utilizado, ANSYS *Fluent*, é uma ferramenta poderosa para análise do escoamento de vento em terrenos de geometria complexa, porém recomenda-se que mais testes sejam realizados, a fim de escolher o modelo de turbulência mais adequado para solucionar o problema de interesse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBEólica - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim Anual de Geração Eólica 2019**. 2020. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/06/PT_Boletim-Anual-de-Gera%C3%A7%C3%A3o-2019.pdf. Acesso em: 20 set. 2020.
- ANSYS. **ANSYS Fluent Theory Guide**. Release 16, ANSYS, Inc, Janeiro, 2016.
- ARAUJO, G. **Avaliação comparativa do estudo de escoamento de ar em um terreno complexo com determinação do potencial eólico e layout do parque em Panambi – RS**. 2015. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/132713>. Acesso em: 15 out. 2020.
- 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. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.
- CASTRO, F. A.; PALMA, J. M. L. M.; LOPES, A. S. Simulation of the Askervein Flow. Part 1: Reynolds Averaged Navier–Stokes Equations (k ϵ Turbulence Model). **Boundary-layer meteorology**, v. 107, n. 3, p. 501-530, 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1022818327584>. Acesso em: 15 out. 2020.
- COSTA, L. M. F. **Investigação numérica de modelos de turbulência no escoamento do vento em pontes suspensas**. 2018. 150 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-05032018-145557/publico/LeandroMalveiraFerreiraCostaCorr18.pdf>. Acesso em: 15 out. 2020.

CRASTO, G. **Numerical simulations of the atmospheric boundary layer**. Universita degli Studi di Cagliari: Cagliari, Italy, 2007.

DUMONT, G. B. **Análise do Potencial Eólico de um Terreno Complexo Empregando Modelagem Numérica da Camada Limite Atmosférica via OpenFOAM**. 2019. 40 f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/200099>. Acesso em: 15 out. 2020.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução À Mecânica Dos Fluidos**. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2000.

GOBBI, M. F.; DORWEILER, R. P. Simulation of wind over a relatively complex topography: application to the Askervein Hill. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 34, n. 4, p. 492-500, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262444215_Simulation_of_Wind_Over_a_Relatively_Complex_Topography_Application_to_the_Askervein_Hill. Acesso em: 15 out. 2020.

IEA - *INTERNATIONAL ENERGY ASSOCIATION*. **World Energy Outlook 2019**. Paris: IEA, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>. Acesso em: 15 set. 2020.

IEA - *INTERNATIONAL ENERGY ASSOCIATION*. **Renewable Power**. Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewable-power>. Acesso em: 15 set. 2020.

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. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045782574900292>. Acesso em: 15 out. 2020.

PETRY, A. P. **Análise numérica de escoamentos turbulentos tridimensionais empregando o método de elementos finitos e simulação de grandes escalas**. 2002. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/2479>. Acesso em: 15 out. 2020.

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

RADÜNZ, W. C. **Metodologia de micrositing 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. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/178563>. Acesso em: 15 out. 2020.

RICHARDSON, L. F. **Weather Prediction by Numerical Process**. Cambridge: Cambridge University Press, 1920.

SHIH, T. H. *et al.* A New Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation. **Computers Fluids**, v. 24, n. 3, p. 227-238, 1995.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004579309400032T>. Acesso em: 15 out. 2020.

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

TAYLOR, P. A.; TEUNISSEN, H. The Askervein hill project: overview and background data. **Boundary Layer Meteorology**, v. 39, p. 15-39, 1987. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/6211708>. Acesso em: 15 out. 2020.

TAYLOR, P. A.; TEUNISSEN, H. W. The Askervein hill project: report on the September/October 1983 main field experiment. **Atmospheric Environment Service**, v. 84, n. 6, 1985. Disponível em: <http://www.yorku.ca/pat/research/Askervein/ASK83.pdf>. Acesso em: 15 out. 2020.

VECINA, T.-D. J. **Investigação da camada limite atmosférica simulada em túnel de vento no topo de morros utilizando dinâmica dos fluidos computacional (CFD)**. 2017. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/158347>. Acesso em: 15 out. 2020.

ZHANG, M. **Wind resource assessment and micro-siting: science and engineering**. Singapura: Wiley, 2015.