



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E  
NUCLEARES

CHARLES ANDRÉ OLIVEIRA PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO DO VENTO LOCAL A PARTIR DE MODELAGEM DA  
CAMADA LIMITE PLANETÁRIA E MODELAGEM CFD COM OPENFOAM**

Recife  
2020

CHARLES ANDRÉ OLIVEIRA PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO DO VENTO LOCAL A PARTIR DE MODELAGEM DA  
CAMADA LIMITE PLANETÁRIA E MODELAGEM CFD COM OPENFOAM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Fontes Renováveis de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira.

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Carlos Araújo da Costa

Recife

2020

P436c Pereira, Charles André Oliveira.  
Caracterização do vento local a partir de modelagem da camada limite planetária e modelagem CFD com OpenFOAM / Charles André Oliveira Pereira. - 2020.  
81 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira.  
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Carlos Araújo da Costa.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2020.

Inclui Referências.

1. Energia nuclear. 2. Avaliação de recurso eólico. 3. Simulações CFD. 4. OpenFOAM. 5. Camada limite planetária. I. Lira, Carlos Alberto Brayner de Oliveira (Orientador). II. Costa, Alexandre Carlos Araújo da (Coorientador). III. Título.

UFPE

621.042 CDD (22. ed.)

BCTG/2021-74

CHARLES ANDRÉ OLIVEIRA PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO DO VENTO LOCAL A PARTIR DE MODELAGEM DA  
CAMADA LIMITE PLANETÁRIA E MODELAGEM CFD COM OPENFOAM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Fontes Renováveis de Energia.

Aprovada em: 30/10/2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Mário Augusto Bezerra da Silva (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Leorlen Yunier Rojas Mazaira (Examinador Externo)  
Comissão Nacional de Energia Nuclear

---

Prof. Dr. Daniel González Rodríguez (Examinador Externo)  
Comissão Nacional de Energia Nuclear

---

Prof. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

Várias pessoas contribuíram direta ou indiretamente com o trabalho descrito nesta dissertação, e o meu agradecimento a elas não poderia ficar de fora.

Agradeço primeiro a Deus por colocar ao meu lado pessoas magníficas que me ajudaram de diferentes formas, e por permitir que tudo isso tenha sido realizado.

Aos meus pais, Aldenice e Geraldo, por serem os melhores pais, sempre superestimando minha capacidade intelectual, e contando para vizinhos e familiares as minhas conquistas.

Ao meu orientador Carlos Brayner, pela confiança e acompanhamento do meu trabalho desde a graduação.

Ao meu co-orientador Alexandre Costa, pelo acolhimento e pelas ideias dadas a cada reunião nossa, as quais sempre contribuíram de forma positiva com o trabalho, e renovavam o nível de entusiasmo para prosseguir.

Ao meu co-orientador não-oficial Mário Bezerra, pelo seu olhar atento, sempre trazendo questionamentos relevantes.

A Leorlen Mazaira, Daniel Rodríguez, Paulo Lyra, e Ramiro Willmersdorf, por me ensinar as boas práticas da modelagem com CFD.

A João Oliveira, pela amizade, e por participar comigo do aprendizado sobre CFD.

A todos os funcionários da UFPE, em especial, aqueles do Departamento de Energia Nuclear (DEN-UFPE) e do Centro de Energias Renováveis (CER-UFPE), nas figuras de Josenildo Jorge, Floriano Melchiades, Evelyn Moreira, e vários outros.

Aos meus amigos que, muitas vezes, mesmo sem entender o que eu faço, incentivam e comemoram as minhas conquistas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao projeto HPC4E (<https://hpc4e.eu/the-project/work-plan/wp4>) do H2020 Programme (GRANT AGREEMENT N° 689772)/3ª Chamada Brasil-União Europeia (CTIC-RNP-MCTI) e ao projeto IBITU.INTELIPREV do Programa de P&D ANEEL pelo suporte financeiro.

## RESUMO

O crescimento acentuado da potência eólica instalada no Brasil vem demandando metodologias para a avaliação do recurso eólico cada vez mais competitivas. Nesse contexto, o presente trabalho tem o objetivo geral de caracterizar o vento local por meio de uma metodologia (aqui, proposta) que está baseada em modelagem analítica da Camada Limite Planetária e simulações dos efeitos orográficos de microescala com o código CFD (*Computational Fluid Dynamics*) OpenFOAM. Para a avaliação da metodologia proposta, foram definidos dois estudos de caso, um correspondente a uma estação anemométrica localizada no município de Paracuru (PCR), no estado do Ceará, e outro correspondente a uma estação anemométrica localizada no município de Triunfo (TRI), no estado de Pernambuco. Esses dois locais apresentam características orográficas distintas, apresentando PCR uma orografia simples e TRI uma orografia complexa. Em ambos estudos de caso, intercomparam-se duas abordagens: uma analítica, baseada no trabalho de Silva (2017), que utiliza modelos da Camada Limite Planetária para estimar o comportamento do vento na microescala; outra abordagem baseada em CFD, que utiliza as saídas da abordagem anterior como condição de contorno com vistas a simular o vento no local de interesse. Em PCR, as duas abordagens apresentaram resultados semelhantes, superestimando os fatores de Weibull. Em TRI, a abordagem com OpenFOAM obteve um desempenho melhor que a abordagem analítica, tal como era esperado, reduzindo o erro com respeito à densidade de potência eólica média de 12,1% para 1,6%. Em suma, o uso de CFD juntamente com modelos analíticos da Camada Limite Planetária, para caracterização do vento local, mostrou-se bastante promissor, uma vez que, em função da metodologia aqui proposta, apresenta um custo computacional relativamente baixo e permite realizar uma avaliação preliminar do recurso eólico em áreas de interesse para instalação de centrais eólicas. Contudo, mais testes são necessários.

Palavras-chave: Avaliação de recurso eólico. Simulações CFD. OpenFOAM. Camada limite planetária.

## ABSTRACT

The fast growth of the installed wind power capacity in Brazil has been increasingly demanding competitive methodologies for wind resource assessment. In this sense, the general object of this work is to characterize the local wind through a methodology which is based on analytical modeling of the Planetary Boundary Layer and simulations of the microscale orographic effects using the CFD (Computational Fluid Dynamics) code OpenFOAM. For the evaluation of the proposed methodology, two case studies were defined. One of them corresponding to an anemometric mast located in the city of Paracuru (PCR), in the state of Ceará, and the other one corresponding to an anemometric mast located in the city of Triunfo (TRI), in the state of Pernambuco. These two locations have different orographic characteristics so that PCR presents a nearly flat terrain and TRI a complex terrain. Two approaches were intercompared in both case studies: an analytical approach based on the Master's thesis of Silva (2017) which uses Planetary Boundary Layer models to estimate the wind at microscale; and one approach based on CFD which applies the outputs of the first approach as boundary condition in order to simulate the wind at the local of interest. For PCR, both approaches presented similar results. Both overestimated the Weibull parameters. For TRI, the approach with OpenFOAM performed better than the analytical one as expected, reducing from 12.1% to 1.6% the error for mean wind power density. In summary, the use of CFD with Planetary Boundary Layer models for the purpose of local wind characterization has shown to be quite promising, since it presents a relatively low computational cost and allows to perform a preliminary wind resource assessment in areas of interest for the installation of wind farms. However, more tests are needed.

Keywords: Wind resource assessment. CFD simulations. OpenFOAM. Planetary boundary layer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Ilustração da malha de um GCM.....	19
Figura 2 –	Processo de resolução de um problema com CFD.....	21
Figura 3 –	Ilustração de malhas com diferentes transições .....	22
Figura 4 –	Ilustração de ortogonalidade de uma malha.....	22
Figura 5 –	Ilustração de células triangulares com valores distintos de skewness.....	23
Figura 6 –	Ilustração do aspect ratio de uma célula.....	23
Figura 7 –	Representação da Camada Limite Planetária e da Atmosfera Livre.....	28
Figura 8 –	Perfil de velocidade do vento em função da altura.....	29
Figura 9 –	Principais etapas da metodologia empregada no trabalho.....	37
Figura 10 –	Utilização dos dados do GCM pelo modelo LGRN-VT para representar o vento na posição da torre anemométrica (destacam-se apenas os 4 pontos da malha do GCM correspondentes ao nível vertical que proporciona o menor RMSE).....	42
Figura 11 –	Utilização dos dados do GCM pelo modelo LGRN-VT para obter a condição de contorno de velocidade do vento nas simulações CFD (destacam-se apenas os 4 pontos da malha do GCM correspondentes ao nível vertical que proporciona o menor RMSE).....	42
Figura 12 –	Definição das fronteiras para ventos dos setores 0°, 90°, 180° e 270°.....	43
Figura 13 –	Definição das fronteiras para ventos dos setores 45°, 135°, 225° e 315°.....	43
Figura 14 –	Grandezas envolvidas no cálculo do <i>speed-up</i> .....	46
Figura 15 –	Resumo do processo de obtenção dos parâmetros de Weibull pelas abordagens “LGRN-VT” e “LGRN-VT + OpenFOAM” .....	48
Figura 16 –	Localização das torres anemométricas de PCR e TRI, e dos pontos de malha do GCM mais próximos às posições dessas torres.....	52

Figura 17 – Localização da torre anemométrica de Paracuru-CE e dos pontos de malha do GCM mais próximos.....	53
Figura 18 – Mapa de elevação de Paracuru-CE.....	54
Figura 19 – Histograma de direção do vento no período de validação.....	55
Figura 20 – Perfil vertical de velocidade referente à direção de 90° usado como condição de contorno em PCR.....	56
Figura 21 – Análise de dependência de malha.....	57
Figura 22 – Corte com a magnitude U (em m/s).....	58
Figura 23 – Resultados para o fator de escala em PCR utilizando o método da máxima verossimilhança (M1), o método do fator de energia padrão (M2) e o método empírico (M3).....	59
Figura 24 – Resultados para o fator de forma em PCR utilizando o método da máxima verossimilhança (M1), o método do fator de energia padrão (M2) e o método empírico (M3).....	59
Figura 25 – Curvas de Weibull das diferentes modelagens.....	61
Figura 26 – Localização da torre anemométrica de Triunfo-PE e dos pontos de malha do GCM mais próximos.....	63
Figura 27 – Mapa de elevação de Triunfo-PE.....	64
Figura 28 – Histograma de direção do vento no período de validação.....	65
Figura 29 – Perfil vertical de velocidade usado como condição de contorno em TR.....	65
Figura 30 – Corte com a magnitude U (em m/s) na direção 90°.....	67
Figura 31 – Resultados para o fator de escala em TRI utilizando o método da máxima verossimilhança (M1), o método do fator de energia padrão (M2) e o método empírico (M3).....	68
Figura 32 – Resultados para o fator de forma em TRI utilizando o método da máxima verossimilhança (M1), o método do fator de energia padrão (M2) e o método empírico (M3).....	68
Figura 33 – Curvas de Weibull das diferentes modelagens.....	70
Figura 34 – Médias mensais de velocidade do vento em TRI.....	72
Figura 35 – Vista em perfil do mapa de velocidade a 100 m acima do solo em Triunfo-PE (simulação de vento a 90°).....	73
Figura 36 – Tempo de execução das simulações em PCR e TRI.....	74



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Metadados dos estudos de caso.....	38
Tabela 2 – Condições de contorno.....	44
Tabela 3 – Speed-ups calculados para diferentes condições de vento.....	47
Tabela 4 – Speed-ups para diferentes condições de vento (em PCR).....	58
Tabela 5 – Resultados das abordagens “LGRN-VT” e “LGRN-VT + OpenFOAM” em PCR.....	62
Tabela 6 – Resultados das abordagens “LGRN-VT” e “LGRN-VT + OpenFOAM” em PCR.....	62
Tabela 7 – Speed-ups para diferentes condições de vento (em TRI).....	66
Tabela 8 – Resultados das abordagens “LGRN-VT” e “LGRN-VT + OpenFOAM” em TRI.....	70
Tabela 9 – Resultados das abordagens “LGRN-VT” e “LGRN-VT + OpenFOAM” em TRI.....	71

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>CONCEITOS PRELIMINARES</b> .....	<b>17</b>
2.1	DOWNSCALING .....	17
2.2	MODELOS DE CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA (GENERAL <i>CIRCULATION MODELS</i> , GCMS) .....	18
2.3	DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL .....	19
2.4	OPENFOAM.....	25
2.5	ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA.....	27
2.6	MODELAGEM DA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA.....	28
2.7	FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (PDF) DE WEIBULL E DENSIDADE DE POTÊNCIA EÓLICA .....	31
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>37</b>
4.1	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO .....	37
4.2	MODELAGEM ANALÍTICA E SIMULAÇÕES CFD .....	39
<b>4.2.1</b>	<b>Modelagem analítica</b> .....	<b>39</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Simulações CFD</b> .....	<b>42</b>
4.2.2.1	Pré-processamento .....	42
4.2.2.2	Solução .....	45
4.2.2.3	Pós-processamento .....	45
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO VENTO NO LOCAL DE INTERESSE .....	47
4.4	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS .....	48
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>52</b>
5.1	RESULTADOS EM PARACURU-CE (PCR) .....	52
<b>5.1.1</b>	<b>Caracterização topográfica e do regime de vento</b> .....	<b>53</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Definição da condição de contorno da velocidade</b> .....	<b>55</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Dependência de malha</b> .....	<b>56</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Simulações</b> .....	<b>57</b>
<b>5.1.5</b>	<b>Estimação dos parâmetros de Weibull</b> .....	<b>58</b>
5.2	RESULTADOS EM TRIUNFO-PE (TRI).....	63
<b>5.2.1</b>	<b>Caracterização topográfica e do regime de vento</b> .....	<b>63</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Definição da condição de contorno da velocidade</b> .....	<b>65</b>

5.2.3	Qualidade de malha .....	66
5.2.4	Simulações .....	66
5.2.5	Estimação dos parâmetros de Weibull.....	67
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS .....	76
	REFERÊNCIAS .....	78

## 1 INTRODUÇÃO

Na última década, tem-se observado, no Brasil, um aumento contínuo da participação da Energia Eólica na matriz elétrica nacional, aumento associado a várias razões, tais como, por exemplo, os sucessivos leilões organizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a economia de escala experimentada pelos aerogeradores e as políticas de atração de investimentos de alguns estados da Região Nordeste do Brasil (ABEEólica, 2020). Em 2007, a capacidade eólica instalada no Brasil era de apenas 247 MW (EPE, 2008), uma participação de 0,1 % na matriz elétrica nacional. Em 2019, 12 anos depois, a potência instalada passou a 15,45 GW, 9,1 % da matriz elétrica nacional, colocando o Brasil em oitavo lugar no ranking mundial de capacidade instalada (ABEEólica, 2020). As Regiões brasileiras com maior relevância na geração de eletricidade a partir dos ventos são a Sul e Nordeste. Nesta última, estão alocados mais de 80% dos parques eólicos nacionais, evidenciando a importância da Região com respeito ao aproveitamento de energia eólica no país.

É interessante mencionar que o Brasil, especialmente a região Nordeste, tem um potencial eólico bastante expressivo, com muitas áreas ainda não exploradas. Dessa forma, tem-se buscado aproveitar o conteúdo energético de tais áreas, identificando as chamadas “jazidas de vento”, áreas com ventos favoráveis para a geração eólica. Essa identificação das áreas com bons ventos é uma das etapas iniciais em projetos de centrais eólicas, sendo a Avaliação do Recurso Eólico fundamental nesta etapa. Cabe enfatizar que avaliar o recurso eólico implica em quantificar o conteúdo de energia cinética em longo prazo correspondente a uma dada localização e altura, i.e., o recurso eólico implica em uma caracterização local (de alta resolução espacial) e sobre um período suficientemente longo (climatologicamente significativo) (LANDBERG et al., 2003). De forma a quantificar o recurso eólico de um local, é conveniente representar a distribuição de velocidades do vento horizontal em superfície através de uma função de densidade de probabilidade (PDF), que, por convenção, em Energia Eólica, é a PDF de Weibull, a qual depende de dois parâmetros: o fator de escala, que traz informação sobre o valor médio, e o fator de forma, que traz informação sobre a dispersão das amostras em torno do valor médio da velocidade do vento. Para a instalação de aerogeradores, com vistas a maximizar a produção de tais máquinas, buscam-se

lugares com altos fatores de escala e de forma. Vários são os métodos utilizados para avaliar o recurso eólico, desde métodos como aqueles baseados em campanhas de medição e estratégias simples de *downscaling* estatístico com vistas à extensão de séries temporais de saída de Modelos da Circulação Geral atmosférica (*General Circulation Models*, GCMs), até a modelagem atmosférica mesoescalar acoplada à modelagem microescalar baseada em Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) (LANDBERG et al., 2003).

Dentre os métodos citados anteriormente, o uso de modelos baseados em CFD em problemas relacionados à Energia Eólica vem se consolidando cada vez mais. Parte disso, por conta do desenvolvimento de computadores mais potentes, que permitem executar simulações mais robustas. De forma geral, CFD é uma técnica numérica na qual as equações que descrevem o escoamento do fluido são resolvidas em um computador. No caso da Energia Eólica, o interesse é no escoamento na Camada Limite Planetária (*Planetary Boundary Layer*, PBL), também chamada de Camada Limite Atmosférica (*Atmospheric Boundary Layer*, ABL) (FRANKE et al., 1980). A PBL é, em resumo, a porção da atmosfera mais próxima à superfície, estando suscetível diretamente aos efeitos mecânicos e térmicos provocados pela superfície (LANDBERG, 2001).

Silva (2017), em sua dissertação de Mestrado, utilizou vários modelos analíticos que buscam descrever o vento na PBL e obteve resultados acurados em regiões do litoral brasileiro com orografia simples. Por outro lado, os modelos não geraram resultados satisfatórios em regiões de orografia complexa no interior da Bahia. Ele supôs que tal fato poderia estar relacionado à grande influência da orografia no vento local, a qual não é considerada com suficiente detalhe em seus modelos. Para resolver esse problema, ele sugeriu o uso de modelos baseados em CFD, mais indicados para simular fenômenos microescalares tais como, por exemplo, o efeito da orografia de alta resolução sobre o comportamento do vento. Vale mencionar que alguns dos modelos tratados por Silva (2017) fazem uso de métodos numéricos para estimar algumas variáveis. Porém, como tais métodos apresentam um custo computacional baixo, optou-se, aqui, por continuar chamando esses modelos de analíticos mesmo com o uso de métodos numéricos.

De maneira a dar continuidade ao trabalho de Silva (2017), agora no contexto de simulações CFD e de avaliação de recurso eólico, o objetivo geral deste trabalho é caracterizar o vento local, através de estimativas dos parâmetros de Weibull e da

densidade de potência média, a partir de duas abordagens: (i) utilizando um modelo de PBL de forma analítica; (ii) utilizando simulações CFD com o perfil de velocidade do vento dado pelas saídas do modelo de PBL, e verificar se o emprego do código CFD (com vistas ao detalhamento dos efeitos orográficos em microescala) permite reproduzir de forma mais acurada os parâmetros de Weibull e a densidade de potência eólica média representativos dos dados observacionais de torres anemométricas. Quanto à segunda abordagem, baseada em simulações com código CFD e modelagem da PBL, destaca-se a contribuição inovadora deste trabalho ao utilizar um acoplamento direto da macroescala para a microescala por meio da modelagem analítica, diminuindo o custo computacional envolvido na metodologia como um todo se comparado, por exemplo, ao custo computacional de metodologias que empregam modelagem mesoescalar e CFD (GOPALAN et al., 2014; TEMEL et al., 2018). Como objetivos específicos, destacam-se: (a) avaliação dos resultados com respeito à complexidade orográfica dos locais de estudo (Paracuru-CE, com orografia simples; e Triunfo-PE, com orografia mais complexa); (b) avaliação dos resultados com respeito ao modelo de turbulência usado nas simulações CFD; e (c) avaliação dos resultados com respeito ao uso de diferentes métodos para a inferência dos parâmetros de Weibull. Vale mencionar que não foi possível analisar os mesmos locais com orografia complexa abordados por Silva (2017), pois não há informação sobre a posição exata dos anemômetros para esses locais, inviabilizando a validação dos resultados com a abordagem CFD. Logo, foi escolhido um outro local com orografia complexa.

Com relação à estrutura deste trabalho, ele está dividido basicamente em seis seções, sendo elas, respectivamente: Introdução, Conceitos Preliminares, Revisão de Literatura, Metodologia, Resultados e Discussão e Conclusões e Perspectivas.

## 2 CONCEITOS PRELIMINARES

### 2.1 DOWNSCALING

Os fenômenos meteorológicos ocorrem, de forma geral, em três escalas espaciais: a macroescala (também chamada de escala sinóptica, ou planetária), a mesoescala, e a microescala. Na macroescala, os processos meteorológicos apresentam um comprimento característico da ordem de milhares de quilômetros (movimentos ciclônicos e anti-ciclônicos, por exemplo). A microescala é caracterizada pelos fenômenos mais locais, com comprimento da ordem de centenas de metros. A mesoescala, por sua vez, é uma escala intermediária, na qual ocorrem processos induzidos termicamente, como as brisas, com comprimento característico da ordem de centenas de quilômetros (ORLANSKI, 1975; COSTA, 2005).

Na engenharia eólica, a variável meteorológica mais relevante é a velocidade do vento. Além disso, na maioria das vezes, é necessário estudar o comportamento dessa variável na microescala, ou seja, precisa-se conhecer bem a velocidade do vento numa região de interesse, não muito maior que alguns quilômetros. Se existissem várias torres anemométricas distribuídas espacialmente nessa região de interesse, medindo a velocidade do vento por um período climatologicamente significativo (da ordem de dezenas de anos), seria possível estimar o regime de vento local com bastante precisão. Contudo, tal prática é inviável economicamente, e a técnica de *downscaling* surge como alternativa para resolver o problema da escassez de dados sobre o vento, ou qualquer outra variável meteorológica, na microescala.

A técnica de *downscaling*, ou seja, redução de escala, consiste em estimar o comportamento de uma variável em uma escala espacial menor, a partir do seu comportamento em uma escala maior, como a escala planetária, por exemplo (WILBY; WIGLEY, 1997). O *downscaling* é amplamente utilizado nas ciências atmosféricas, principalmente para inferir o comportamento de variáveis como temperatura e precipitação. Por outro lado, como dito anteriormente, a área de energia eólica tem um maior interesse na velocidade do vento.

Para estimar a velocidade do vento na microescala, é comum utilizar dados da macroescala, uma vez que existem modelos numéricos de grande escala

responsáveis pela simulação de diversas variáveis meteorológicas em todo o planeta, os chamados GCMs (do inglês, *General Circulation Models*), com uma base de dados de dezenas de anos. Mais informações sobre os GCMs serão dadas na seção 2.2.

A utilização dos dados de um GCM para inferência do comportamento local pode se dar basicamente de duas maneiras: de forma estatística, ou de forma dinâmica. A abordagem estatística da técnica de *downscaling* consiste em encontrar uma forma de utilizar os dados do GCM de modo a minimizar alguma função de erro. Por outro lado, a abordagem dinâmica utiliza leis físicas para estimar as variáveis na microescala.

## 2.2 MODELOS DE CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA (GENERAL CIRCULATION MODELS, GCMS)

Os Modelos de Circulação Geral da Atmosfera são modelos numéricos que resolvem as equações das leis de conservação (massa, energia, momento) em uma malha que envolve todo o globo terrestre (ver Figura 1), simulando o comportamento de diversas variáveis atmosféricas como velocidade e direção do vento, temperatura, precipitação, etc. Por apresentar um domínio computacional tão extenso, o planeta inteiro, os GCMs têm uma malha com baixa resolução espacial, com pontos de malha a cada 100 quilômetros, em média. Tal característica faz com que alguns efeitos locais, como a influência da orografia no perfil de vento, por exemplo, sejam suavizados e, portanto, o uso direto de dados de GCMs para representar efeitos microescalares não é aconselhado. Por outro lado, o uso de seus dados são amplamente utilizados como condições iniciais e de contorno para modelos mesoescalares e microescalares (*downscaling*).

Figura 1- Ilustração da malha de um GCM



Fonte: Escritório de Meteorologia do Governo de New South Wales (2003).

Os Modelos de Circulação Geral da Atmosfera são desenvolvidos por alguns centros de pesquisa ao redor do mundo, diferenciando-se um do outro, em geral, pela resolução espacial e cobertura temporal. Como principais GCMs, destacam-se aqueles desenvolvidos pelas seguintes instituições:

- *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*;
- *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*;
- *National Center for Environmental Prediction (NCEP)*.

Neste trabalho, serão utilizados dados do GCM do programa *Era-Interim*, pertencente ao ECMWF, que apresenta uma resolução horizontal de  $0,75^\circ$  (aproximadamente 83 quilômetros) e dados disponíveis desde 1979. Tal escolha foi baseada no fato de que o trabalho de Silva (2017) utilizou essa mesma base de dados, que, por sua vez, é bastante validada (DEE et al., 2011).

### 2.3 DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

A Dinâmica de Fluidos Computacional, comumente chamada de CFD, acrônimo em inglês para *Computational Fluid Dynamics*, é responsável pela análise de sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados, como reações químicas, com uso de simulação computacional (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Ela pode ser vista como uma junção de duas grandes áreas do conhecimento, a dinâmica de fluidos e o cálculo numérico. A dinâmica de fluidos propõe as equações que descrevem o escoamento

dos fluidos, que na maioria das vezes são equações diferenciais ou integrais, e o cálculo numérico se encarrega de resolver tais equações, a partir de discretizações propostas por diferentes métodos numéricos.

Dentre as equações que governam o escoamento dos fluidos, destacam-se as chamadas equações de transporte, que são aquelas que representam leis físicas de conservação, como a lei de conservação da massa (também conhecida como lei da continuidade), do momento, e da energia. As equações de transporte podem ser escritas em um formato geral, mostrado a seguir.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \varphi dV + \oint_A \rho \varphi v \cdot dA = \oint_A \Gamma_\varphi \nabla \varphi \cdot dA + \int_V S_\varphi dV \quad (1)$$

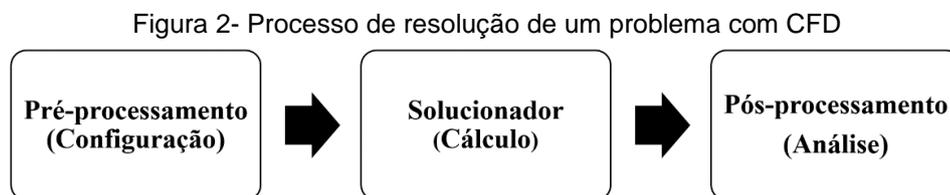
em que  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $\varphi$  é um parâmetro referente à grandeza física estudada (energia, por exemplo),  $v$  é a velocidade do fluido,  $\Gamma_\varphi$  é o coeficiente de difusão, e  $S_\varphi$  uma fonte ou sumidouro. O primeiro termo da equação 1 é chamado de termo transiente, e refere-se à taxa de variação da grandeza  $\varphi$  dentro do volume de controle  $V$ . O segundo termo, termo advectivo, refere-se ao fluxo de  $\varphi$  devido à convecção nas fronteiras do volume de controle. O terceiro termo, termo difusivo, está relacionado ao fluxo de  $\varphi$  devido à difusão nas fronteiras do volume de controle. O último termo, por sua vez, refere-se à taxa de criação ou retirada de  $\varphi$  dentro do volume de controle. Para obter a equação de transporte de uma grandeza em específico, basta escolher os valores apropriados para  $\varphi$ ,  $\Gamma_\varphi$ , e  $S_\varphi$ . Para exemplificar, a equação da continuidade, ou de conservação da massa, é obtida ao adotar  $\varphi$  igual a um, e  $\Gamma_\varphi$  e  $S_\varphi$  iguais a zero, resultando na seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \oint_A \rho v \cdot dA = 0 \quad (2)$$

Vale mencionar que grande parte dos estudos em CFD, especialmente aqueles baseados no método dos volumes finitos, utilizam as equações de transporte em sua forma integral, pois, dessa forma, é garantida a conservação local da grandeza.

Em se tratando das simulações CFD, elas são geralmente divididas em três etapas, a etapa de pré-processamento, do solucionador, e de pós-processamento.

Na primeira etapa, que pode ser entendida como uma etapa de configuração da simulação, tem-se a definição do domínio computacional a ser utilizado, e a geração de malha, que consiste em dividir tal domínio em vários subdomínios. Ainda nessa etapa, são definidas as propriedades físicas do fluido, o modelo de turbulência a ser utilizado, e as condições iniciais e de contorno do problema. Uma vez configurado o problema, tem-se início a etapa seguinte, a etapa do solucionador ou de solução, que é a simulação em si, ou seja, é a etapa na qual as equações integrais que modelam a física do problema são convertidas em sistemas de equações algébricas, a partir de algum método de discretização (diferenças finitas, elementos finitos, ou volumes finitos), e são resolvidas. Vale mencionar que o método dos volumes finitos é o mais utilizado nos *softwares* CFD comerciais, e é o método utilizado pelo OpenFOAM, o *software* que será usado neste trabalho para a realização das simulações. Por fim, a etapa final de pós-processamento, é responsável pela otimização da visualização dos resultados obtidos na etapa anterior, através da criação de gráficos claros e objetivos, por exemplo, e pela análise de tais resultados. A Figura 2, a seguir, resume o processo de resolução de um problema através de ferramentas de CFD.

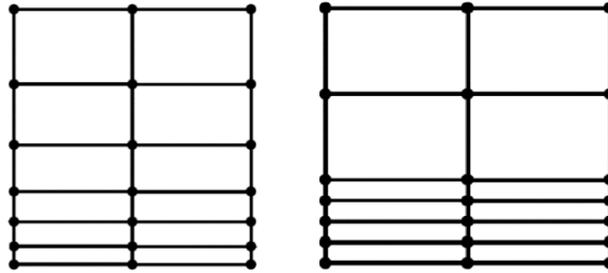


Fonte: O Autor (2020).

Como dito anteriormente, a geração da malha de um problema é de fundamental importância no processo como um todo. É comum afirmar que uma boa malha não garante resultados acurados, mas uma malha de baixa qualidade dificilmente produzirá resultados fisicamente coerentes. A qualidade de uma malha pode ser quantificada através de alguns parâmetros. Cada um deles apresenta um valor de referência, no qual considera-se aceitável a qualidade da malha com respeito à característica da malha tratada por tal parâmetro. Para exemplificar, serão definidos os quatro principais parâmetros de qualidade de malha, juntamente com seus respectivos valores de referência.

**Smoothness:** também conhecido como razão de expansão, define a transição em tamanho entre células adjacentes. O valor de referência, neste caso, é de 20%. Ou seja, a máxima mudança de tamanho entre células adjacentes deve ser menor que 20%. Na Figura 3, a malha da esquerda apresenta uma transição suave e a malha da direita abrupta.

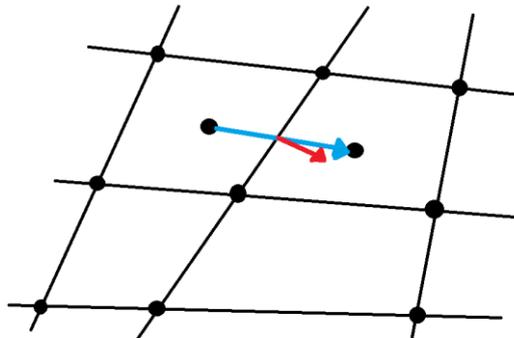
Figura 3 - Ilustração de malhas com diferentes transições



Fonte: O Autor (2020).

**Orthogonality:** envolve o ângulo entre o vetor que une os centróides de células adjacentes (vetor azul da Figura 4), e o vetor normal à interface entre elas (vetor vermelho da Figura 4). Tal ângulo não deve exceder  $65^\circ$ .

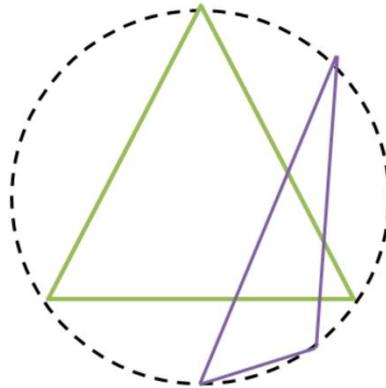
Figura 4- Ilustração de ortogonalidade de uma malha



Fonte: O Autor (2020).

**Skewness:** refere-se à deformação das células. A Figura 5 mostra um triângulo equilátero (verde) com baixo valor de *skewness*, e um triângulo escaleno (roxo) com alto valor de *skewness*. O valor de referência usado para este parâmetro é 4. Ou seja, buscam-se malhas com valores de *skewness* inferiores a 4.

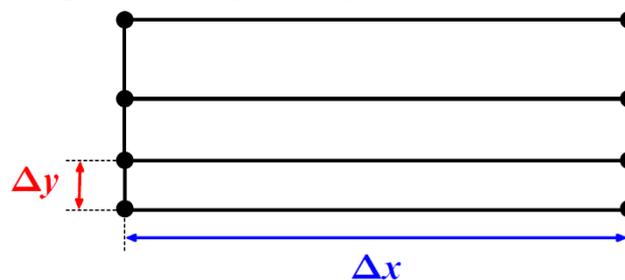
Figura 5 - Ilustração de células triangulares com valores distintos de skewness



Fonte: Wikipédia

**Aspect ratio:** refere-se à razão entre a aresta de maior comprimento e a de menor comprimento de uma célula. Uma malha ideal tem um *aspect ratio* de 1. Contudo, principalmente em aplicações envolvendo camada limite, é preciso ter células com uma das dimensões bastante menor que às demais, para poder captar os gradientes na região. Logo, é aceitável ter um *aspect ratio* de até 100. A Figura 6 ilustra as dimensões de uma célula, sendo o *aspect ratio* a razão entre  $\Delta x$  e  $\Delta y$ .

Figura 6- Ilustração do aspect ratio de uma célula



Fonte: O Autor (2020).

Vale mencionar que cada *software* CFD utiliza valores de referência para qualidade de malha que podem ser distintos. Os valores mostrados aqui são aqueles usados pelo OpenFOAM por *default* na aplicação *checkMesh*.

Ainda com relação às simulações CFD, existem três principais abordagens para modelar o fenômeno da turbulência. Uma abordagem mais complexa, chamada de DNS (*Direct Numerical Simulation*), na qual as equações são resolvidas com o mínimo de aproximações, e resolvem todas as escalas de turbulência relevantes, exigindo, por essas e outras razões, um poder computacional elevado. Uma

abordagem intermediária, LES (*Large Eddy Simulation*), na qual são priorizadas as escalas maiores de turbulência. E, por fim, a chamada RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), a abordagem mais utilizada nos estudos de vento sobre terrenos complexos, como será visto na seção de revisão da literatura, a qual realiza médias nas equações de Navier-Stokes, e é a abordagem que exige o menor poder computacional, entre as três.

Ao utilizar a abordagem RANS, as variáveis das equações são decompostas em uma componente média  $\bar{u}$  e uma componente de flutuação  $u'$ , de modo que o valor instantâneo da variável é dado pela soma dessas componentes ( $u = \bar{u} + u'$ ). Além disso, assume-se que o termo das flutuações pode ser separado do termo médio. Ao fazer isso com a velocidade, surgem incógnitas conhecidas como “*Reynolds stresses*”, que são funções das flutuações da velocidade, que precisam de um modelo de turbulência para serem resolvidas. Um dos modelos de turbulência mais conhecidos é o k-epsilon padrão, que é baseado em um esquema de duas equações (POPE, 2001). Nele, a viscosidade turbulenta é definida como:

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

onde  $C_\mu$  é uma constante do modelo,  $k$  é a energia cinética turbulenta, e  $\varepsilon$  a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta. As variáveis  $k$  e  $\varepsilon$  são obtidas a partir das equações a seguir (MARTINEZ, 2011):

$$\rho \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial(u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

onde  $C_{\varepsilon 1}$  e  $C_{\varepsilon 2}$  são constantes adicionais do modelo, e  $\sigma_k$  é o número de Prandtl turbulento, geralmente tomado igual a 1. Vale mencionar que, para fluxos atmosféricos, algumas dessas constantes assumem valores distintos, caracterizando o chamado modelo k-epsilon atmosférico (MARTINEZ, 2011; AZEVEDO, 2013). Outra variante do modelo k-epsilon é a chamada *realizable* k-epsilon, na qual  $C_\mu$  não

é mais constante. A classe k-epsilon de modelos de duas equações é conhecida por não descrever bem o escoamento em regiões com gradientes acentuados de pressão. Para contornar essa limitação, foi proposto o modelo k-omega, no qual a variável  $\omega$  representa a frequência de dissipação, e está relacionada a  $k$  e  $\varepsilon$  da seguinte maneira:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{\beta^* k} \quad (6)$$

onde  $\beta^*$  é uma constante com mesmo significado físico de  $C_\mu$ . Dessa forma, considerando  $\beta^* = C_\mu$ , a viscosidade turbulenta passa a ser definida como:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (7)$$

## 2.4 OPENFOAM

O OpenFOAM (do inglês, *Open Field Operation and Manipulation*) é uma biblioteca de código aberto para simulações numéricas baseada na linguagem de programação C++, que começou a ser desenvolvida na década de 80 no *Imperial College of London* e foi lançada em 2004 (FARIA, 2014). Desde então, o OpenFOAM vem sendo bastante utilizado tanto no âmbito acadêmico como industrial.

Dispondo de uma variedade considerável de problemas já configurados, também chamados de casos, o OpenFOAM é uma ferramenta poderosa no que diz respeito à resolução de problemas diversos, como escoamentos compressíveis, incompressíveis, multifásicos, entre outros.

Diferente dos programas comerciais, os quais apresentam uma interface gráfica na qual o usuário define os parâmetros da simulação, no OpenFOAM é preciso manipular arquivos texto contidos em três pastas que compõem cada caso:

- Pasta 0

Essa pasta contém os arquivos que definem as condições iniciais e de contorno das variáveis envolvidas no problema. Tais arquivos são nomeados com os próprios nomes das variáveis (U, k, epsilon, etc).

- Pasta *constant*

Essa pasta contém os arquivos referentes à geometria, à malha do problema, às propriedades físicas do fluido (viscosidade, por exemplo) e ao modelo de turbulência desejado (k-epsilon padrão, realizable k-epsilon, k-omega, etc). Dentro da pasta *constant* existem duas outras pastas: a *polyMesh*, onde ficam os arquivos relacionados à malha (*boundary*, *faces*, *points*, etc), e a *triSurface*, contendo o arquivo da geometria do problema, geralmente em formato STL (*Stereolithography*). O arquivo de definição das propriedades físicas é o *transportProperties*.

- Pasta *system*

Essa pasta contém os arquivos referentes ao procedimento de solução do caso, como os métodos numéricos de discretização, o critério de tolerância para cada variável envolvida, o número máximo de iterações a serem realizadas, etc. O arquivo *controlDict* contém os parâmetros de tempo da simulação (passo de tempo, intervalo de escrita de dados, etc). Os arquivos *fvSolution* e *fvSchemes* contém, respectivamente, informações sobre os métodos de solução do sistema de equações lineares, e os métodos de discretização dos termos das equações diferenciais. Além desses arquivos, a pasta pode conter também o arquivo referente ao gerador de malha próprio do OpenFOAM, o *SnappyHexMesh*, ou, no caso deste trabalho, o qual também utiliza um gerador de malha pensado para fluxo atmosférico sobre terrenos, o arquivo referente ao gerador de malha *terrainBlockMesher*. Mais informações sobre o *terrainBlockMesher* serão dadas no capítulo de Metodologia.

Uma vez dito isso, para simular um problema no OpenFOAM, o usuário pode buscar um dos casos contidos na biblioteca, que mais se assemelha ao seu

problema, e modificar os arquivos contidos nas três pastas mencionadas, adequando os parâmetros ao seu caso. Como mencionado anteriormente, o OpenFOAM contém uma gama enorme de problemas já configurados. Portanto, na maioria das vezes, é possível encontrar um caso semelhante ao problema que se deseja resolver, acelerando o processo de solução, uma vez que parte dela já está feita. O pós-processamento dos resultados fica por conta do *software* ParaView, que permite a criação de gráficos, linhas de corrente, e várias outras funcionalidades. As versões do OpenFOAM e do ParaView utilizadas neste trabalho foram o OpenFOAM v5 e ParaView v5.4.

Não é por acaso que o OpenFOAM vem sendo cada vez mais utilizado em ambientes acadêmicos e industriais. Por ser um programa de código aberto, é possível modificar as modelagens já empregadas por ele, ou implementar novas. Desse modo, os próprios usuários participam da melhoria do programa, sendo incluídos novos modelos a cada nova versão do *software*. Além disso, por ser um programa gratuito, o usuários deixam de arcar com os custos de licença, que nos *softwares* comerciais, variam entre 10 e 50 mil dólares ao ano (CHEN et al., 2014).

## 2.5 ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA

O conceito de estabilidade atmosférica pode ser entendido, de forma simplificada, ao definir diferentes condições. Quando a superfície do continente está mais quente que o ar das vizinhanças, tem-se o chamado regime instável, o qual ocorre geralmente durante o período diurno. Por outro lado, quando o ar adjacente à superfície está mais quente que ela, tem-se o chamado regime estável, que geralmente ocorre durante o período noturno. Na condição intermediária, na qual ocorre a transição do regime instável para o regime estável, acontece, por um curto período, geralmente no fim da tarde, o chamado regime neutro (STULL, 2012).

De maneira a caracterizar tais regimes quantitativamente, ao invés de avaliar o gradiente vertical de temperatura por si só, é mais conveniente avaliar o gradiente vertical da temperatura potencial, pois, dessa forma, a comparação entre parcelas de ar em diferentes níveis de pressão torna-se mais adequada. A temperatura potencial  $\theta$  é definida como:

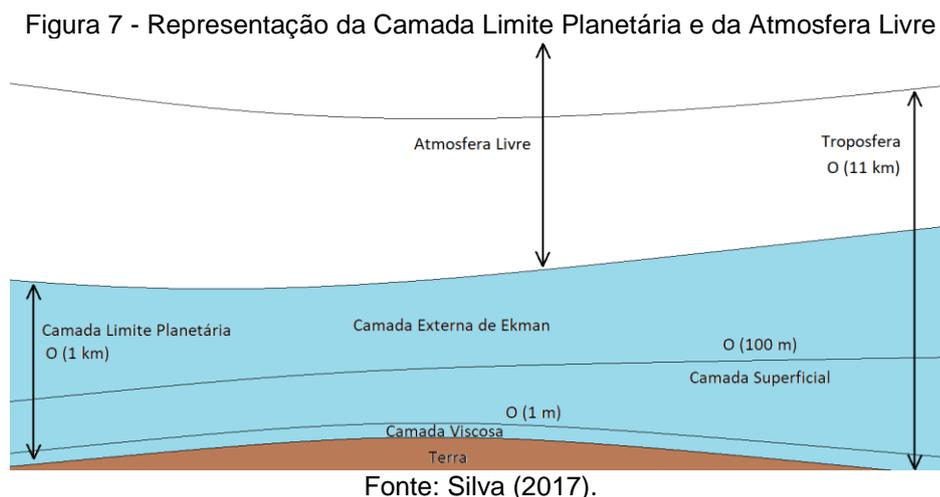
$$\theta = T \left( \frac{P_s}{P} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (8)$$

onde  $T$  é a temperatura no nível de pressão  $P$ ,  $P_s$  é a pressão na superfície,  $R$  é a constante universal dos gases, e  $c_p$  é o calor específico a pressão constante. Dessa forma, se:

- $\partial\theta/\partial z = 0$ , tem-se o regime neutro;
- $\partial\theta/\partial z > 0$ , tem-se o regime estável;
- $\partial\theta/\partial z < 0$ , tem-se o regime instável.

## 2.6 MODELAGEM DA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA

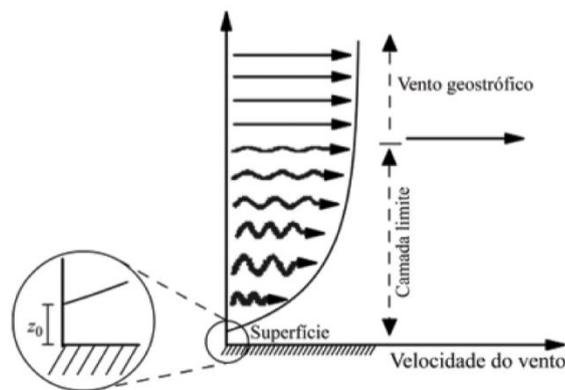
A Camada Limite Planetária, comumente chamada de PBL (*Planetary Boundary Layer*) ou ABL (*Atmospheric Boundary Layer*), é a porção da atmosfera mais próxima à superfície, suscetível aos efeitos térmicos e mecânicos da superfície, e é subdividida em duas principais sub-camadas, a Camada Externa de Ekman e a Camada Superficial (LANDBERG, 2001). A Figura 7 ilustra a PBL e suas sub-camadas. Nela, o termo Atmosfera Livre refere-se à porção da atmosfera a partir da qual os efeitos térmicos e mecânicos produzidos pela superfície não são mais relevantes.



Com relação aos efeitos causados ao vento nas diferentes sub-camadas da PBL, a Camada Externa de Ekman caracteriza-se pela variação tanto na magnitude como na direção do vento. Por outro lado, na Camada Superficial, supõe-se que apenas variações na magnitude da velocidade do vento são observadas, não havendo variação vertical da direção, em função da altura (PANOFSKY, 1959). A

camada viscosa, representada na Figura 7, é uma camada com espessura da ordem de metros, na qual os efeitos mecânicos, como a fricção, são bastante relevantes. Nela, um parâmetro importante a ser considerado é a rugosidade aerodinâmica do solo, que pode ser entendida como a altura na qual a velocidade do vento é nula, ou seja, o ponto onde é satisfeita a condição de não deslizamento. Com relação ao vento na Atmosfera Livre, os efeitos causados pela superfície são desprezíveis. Nessa camada da atmosfera, tem-se o chamado vento geostrófico, que é resultante do balanço entre a força de Coriolis e a força devida ao gradiente de pressão, e representa o vento não perturbado (LANDBERG, 2001). Na Figura 8, temos uma representação do perfil de vento em função da altura, com um destaque para a rugosidade aerodinâmica do solo, chamada de  $z_0$ .

Figura 8 - Perfil de velocidade do vento em função da altura



Fonte: Faria (2014)

As principais equações utilizadas na modelagem da camada limite planetária são a lei logarítmica e a lei de arrasto geostrófico. A lei logarítmica é derivada da lei da parede, que afirma que a velocidade média de um escoamento turbulento em um certo ponto é proporcional ao logaritmo da distância desse ponto até a parede. No campo da energia eólica, a lei logarítmica é expressa da seguinte forma:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + C \quad (9)$$

onde  $u$  é a velocidade no ponto de interesse,  $u_*$  é a velocidade de fricção,  $\kappa$  é a constante de von Kármán (tomada como 0,4),  $z$  é a altura do ponto de interesse,  $z_0$  é a rugosidade aerodinâmica, e  $C$  é uma constante de integração, que, no regime neutro de estabilidade atmosférica, é considerada nula. Vale mencionar que a altura

$z$  descrita aqui, é aquela medida a partir do nível mais baixo. Quando  $z = z_0$ , a velocidade é nula, caracterizando a condição de não deslizamento. Logo, outra forma de escrever a equação 9, é considerar que o valor de  $z$  é medido a partir da rugosidade, e, assumindo  $C = 0$ , tem-se:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \quad (10)$$

A lei logarítmica é utilizada para reproduzir o comportamento do vento na camada superficial. Por outro lado, o vento geostrófico, não perturbado, é caracterizado pela lei de arrasto geostrófico (LANDBERG; WATSON, 1994):

$$G = \frac{u_*}{\kappa} \left\{ \left[ \ln\left(\frac{u_*}{f z_0}\right) - A \right]^2 + B^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

onde  $G$  representa a magnitude do vento geostrófico,  $f$  o fator de Coriolis, e,  $A$  e  $B$ , constantes. Os valores comumente usados para as constantes  $A$  e  $B$  são 1,8 e 4,5, respectivamente (TROEN; PETERSEN, 1989).

Os modelos de PBL adotados por Silva derivam basicamente dessas duas equações descritas. Como será visto posteriormente, o modelo de PBL totalmente físico, ou seja, sem ajustes estatísticos, que gerou melhores resultados, no estudo de caso 2 de sua dissertação, que coincide com um dos locais de estudo deste trabalho, foi o chamado LGRN-VT (SILVA, 2017). Tal modelo utiliza duas equações extras, equações 12 e 13, a fim de obter a magnitude do vento geostrófico,  $G$ .

$$\frac{\partial v_g}{\partial z} = \frac{g}{Tf} \frac{\partial T_x}{\partial x} \quad (12)$$

$$\frac{\partial u_g}{\partial z} = -\frac{g}{Tf} \frac{\partial T_y}{\partial y} \quad (13)$$

Sendo  $G = \sqrt{u_g^2 + v_g^2}$ , utiliza-se a equação 11 de forma iterativa para encontrar o valor de  $u_*$ , e então, a equação 10 para calcular a velocidade do vento na altura de interesse.

## 2.7 FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE (PDF) DE WEIBULL E DENSIDADE DE POTÊNCIA EÓLICA

É comum representar a distribuição de uma variável com respeito à sua frequência de ocorrência através de uma função de densidade de probabilidade (PDF, do inglês *Probability Density Function*). Em se tratando de velocidade do vento para aplicações em energia eólica, a PDF mais usada é a de Weibull, não apenas por sua simplicidade, mas também por ser capaz de ajustar-se bem aos dados experimentais (CARVALHO et al., 2013). A função de densidade de probabilidade de Weibull é dada por:

$$f(V) = \left(\frac{K}{A}\right) \left(\frac{V}{A}\right)^{K-1} \exp\left(-\frac{V}{A}\right)^K \quad (14)$$

onde

- $f(V)$  é a função de densidade de probabilidade (s/m);
- $K$  é o parâmetro/fator de forma de Weibull (.);
- $A$  é o parâmetro/fator de escala de Weibull (m/s);
- $V$  é a velocidade do vento (m/s).

De acordo com o valor de  $K$ , a PDF de Weibull é similar a outros tipos de distribuições estatísticas ( $K = 1$ : Exponencial,  $K = 2$ : Rayleigh,  $K = 3.5$ : Normal) (LIMA; FILHO, 2012). Avaliando o comportamento da curva com respeito aos valores de  $K$  e  $A$ , nota-se que  $A$  é intrinsecamente relacionado ao valor médio da velocidade. Quanto maior o valor de  $A$ , maior é o valor médio da velocidade do vento no local. Por outro lado, o valor de  $K$  relaciona-se com o desvio padrão da distribuição, de forma inversamente proporcional. Quanto maior o valor de  $K$ , menor é o desvio padrão. Dito isto, o objetivo da avaliação de recurso eólico é identificar locais com fatores de forma e escala de Weibull elevados, ou seja, locais com ventos constantes (pouca dispersão em torno da média) e com valor médio elevado.

A potência eólica disponível no vento por unidade de área (densidade de potência) é dada pela equação 15.

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (15)$$

onde  $P(v)$  é a densidade de potência em  $W/m^2$ ,  $\rho$  é a massa específica do ar em  $kg/m^3$ , e  $v$  a magnitude da velocidade do vento em  $m/s$ . A densidade de potência eólica média dos dados medidos é portanto dada pela equação 16 a seguir.

$$P_m = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{2} \rho v_i^3 f(v_i) \right] \quad (16)$$

onde  $P_m$  é a densidade de potência média em  $W/m^2$ , e  $f(v_i)$  a frequência de ocorrência da velocidade  $v_i$ . Se considerar  $f(v_i)$  como sendo a função de densidade de probabilidade de Weibull, a expressão dada pela equação 16 se torna:

$$P_W = \frac{1}{2} \rho A^3 \Gamma \left[ 1 + \frac{3}{K} \right] \quad (17)$$

onde  $P_W$  representa a densidade de potência média em  $W/m^2$  dada pela função de Weibull,  $\Gamma$  representa a função gama,  $A$  o fator de escala de Weibull, e  $K$  o fator de forma de Weibull. Os valores de densidade de potência média que serão mostrados no capítulo de Resultados e Discussão serão obtidos a partir da equação 17.

De acordo com Manwell et al. (2009), valores de densidade de potência média abaixo de  $100 W/m^2$  caracterizam um recurso eólico baixo, valores por volta de  $400 W/m^2$  um recurso eólico bom, e valores acima de  $700 W/m^2$  um ótimo recurso eólico.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

O fluxo atmosférico do vento é um dos principais fenômenos estudados pela chamada Engenharia Eólica Computacional (*Computational Wind Engineering, CWE*), que pode ser definida, de forma simples, como o uso de CFD em aplicações da engenharia eólica (BLOCKEN, 2014). Tais aplicações não se resumem apenas à utilização do vento como fonte de energia, mas também ao estudo da dispersão de poluentes, e à previsão de cargas mecânicas em edificações, por exemplo. Algumas dificuldades relacionadas à CWE foram destacadas por (MURAKAMI, 1998), como os altos números de Reynolds presentes nas aplicações da CWE, que implicam na necessidade de malhas com alta resolução, especialmente nas regiões próximas a paredes, e a natureza complexa dos escoamentos tridimensionais, com a presença de vórtices e desprendimentos de camada limite, que são fenômenos turbulentos difíceis de modelar. Por outro lado, mesmo com essas dificuldades, uma das vantagens de CWE/CFD sobre testes experimentais é que, com as simulações, é possível obter informações detalhadas sobre as variáveis relevantes em todo o domínio de cálculo, diferente dos testes experimentais, em que só é possível obter informações nos pontos instrumentados com sensores (BLOCKEN, 2014).

Com respeito ao estudo do fluxo atmosférico do vento sobre montanhas isoladas e com baixa inclinação, várias fontes afirmam que o primeiro trabalho detalhado nessa área foi o de (JACKSON; HUNT, 1975), no qual os autores desenvolvem uma teoria analítica linear, em duas dimensões, para essa classe de problema, considerando o regime neutro de estabilidade atmosférica, ou seja, sem troca de calor entre a superfície e a atmosfera. Em se tratando do escoamento atmosférico sobre terrenos complexos, e não mais montanhas com inclinações suaves, o trabalho de (RAITHBY et al., 1987) é considerado o primeiro estudo de CFD com essa aplicação. Nesse trabalho, a substituição da modelagem analítica para a modelagem CFD se deu através da utilização da técnica dos volumes finitos, que é a técnica utilizada até hoje, nessa classe de problemas. Os autores comentam que uma das desvantagens da utilização de modelos lineares é que eles são limitados a pequenas perturbações no escoamento, para que a aproximação linear seja válida, e utilizando modelos não lineares com CFD, é possível contornar esse problema e modelar fenômenos turbulentos de forma mais adequada. Vale mencionar também que o trabalho de Raithby et al. (1987) teve como local de

estudo um monte bastante conhecido na literatura, o monte Askervein, o qual foi instrumentado no âmbito de um projeto de pesquisa multi-nacional, relatado por Taylor e Teunissen (1987), e que serve de estudo de caso para diversos trabalhos até os dias atuais (SALMON et al., 1988; BERNARD, 1991; KIM et al., 2000; BITSUAMLAK, 2004; CHOW; STREET, 2009; BALOGH et al., 2012; GARCÍA-SÁNCHEZ; GORLÉ, 2018).

Ainda que o estudo do fluxo atmosférico do vento sobre terrenos de orografia complexa tenha se iniciado décadas atrás, nos dias atuais, ele ainda é um desafio. A turbulência gerada pelos acidentes topográficos é difícil de ser modelada, e as abordagens que conseguem uma melhor caracterização dos fenômenos turbulentos exigem um alto poder computacional. Nesse cenário, embora a abordagem estacionária RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) tenha mostrado deficiências ao simular tais escoamentos, como a incapacidade de modelar fenômenos inerentemente transitórios como a separação e recirculação, e a superestimação da esteira (BLOCKEN, 2014), essa abordagem, juntamente com modelos de turbulência baseados em duas equações ( $k-\varepsilon$ ), é a mais utilizada nas simulações de escoamento atmosférico, considerando o escoamento incompressível, estacionário, turbulento, e com a atmosfera neutramente estratificada (PERALTA et al, 2014). Alguns estudos tem mostrado que a abordagem LES (*Large-Eddy Simulations*) tem uma performance superior comparada à abordagem RANS. Contudo, a utilização de LES implica em algumas desvantagens, sendo a principal delas a necessidade de altíssimo poder computacional, inviabilizando o uso prático, em aplicações industriais, por exemplo. Logo, espera-se que nos próximos anos, a abordagem RANS ainda será predominante.

Além de escolher um modelo de turbulência mais adequado para o problema em análise, gerar uma malha de qualidade, e outros fatores, a escolha de condições de contorno apropriadas para as variáveis do problema é algo bastante relevante, que pode influenciar consideravelmente a acurácia dos resultados obtidos em uma simulação. Nos trabalhos envolvendo escoamento atmosférico do vento, tanto com o objetivo de avaliar o recurso eólico, como para analisar a dispersão de poluentes e conforto térmico de uma cidade, por exemplo, as condições de contorno impostas na entrada do domínio computacional, *inlet*, para os perfis de velocidade, energia cinética turbulenta, e taxa de dissipação da energia cinética turbulenta são, na grande maioria dos trabalhos, os perfis sugeridos por (RICHARDS; HOXEY, 1993),

os quais assumem que o perfil de velocidade do vento segue a lei logarítmica, e que a energia cinética turbulenta é constante ao longo da altura. Como foi visto anteriormente, assume-se que, em regime neutro de estabilidade atmosférica, a lei logarítmica representa bem o perfil do vento em regiões próximas à superfície. Contudo, tal lei foi formulada considerando uma superfície plana, característica bem distinta dos problemas envolvendo terrenos com orografia complexa. Dessa forma, é razoável esperar que sejam observados desvios com relação ao perfil logarítmico, sobretudo em altitudes mais elevadas, longe da superfície. Vale mencionar que, no âmbito da avaliação do recurso eólico, as alturas de interesse são aquelas com magnitude da ordem da altura dos aerogeradores, e os aerogeradores comerciais atuais estão cada vez maiores, chegando a mais de 100 metros de altura. Logo, é possível que se tenha variações no perfil logarítmico nessas condições.

Além dos efeitos mecânicos, que podem distorcer o comportamento logarítmico do perfil, os efeitos térmicos também podem ser relevantes. Silva (2017), em sua dissertação, utilizou vários modelos de camada limite planetária para descrever o vento em onze locais do nordeste brasileiro. Na maioria dos locais, os modelos que consideravam o efeito da temperatura (regime não-neutro) obtiveram melhores resultados. Sobretudo naqueles próximos à costa, podendo ser consequência dos efeitos de brisa.

Os trabalhos que tratam da avaliação de recurso eólico na região Nordeste utilizam, de forma geral, o modelo numérico de mesoescala WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) juntamente com o modelo microescalar WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) (LIMA; FILHO, 2010; CARVALHO et al., 2013; SANTOS et al., 2016), de forma a introduzir os efeitos microescalares, devidos a variações topográficas e de rugosidade, não captados pelo WRF. O fato do WAsP ser pensado para simulações em locais com orografia mais simples (BOWEN; MORTENSEN, 1996; MORTENSEN et al., 2001), acaba sendo uma limitação dessa metodologia para aplicação em locais montanhosos, como o interior de Pernambuco e da Bahia. Essa pode ser uma das causas que levou a uma melhor descrição da PDF de Weibull em um local de orografia simples (Paracuru-CE), que em um local de orografia complexa (Triunfo-PE), em Santos et al. (2016). Uma possível alternativa seria utilizar um *software* CFD ao invés do WAsP, já que a abordagem não linear da dinâmica de fluidos computacional, em terrenos

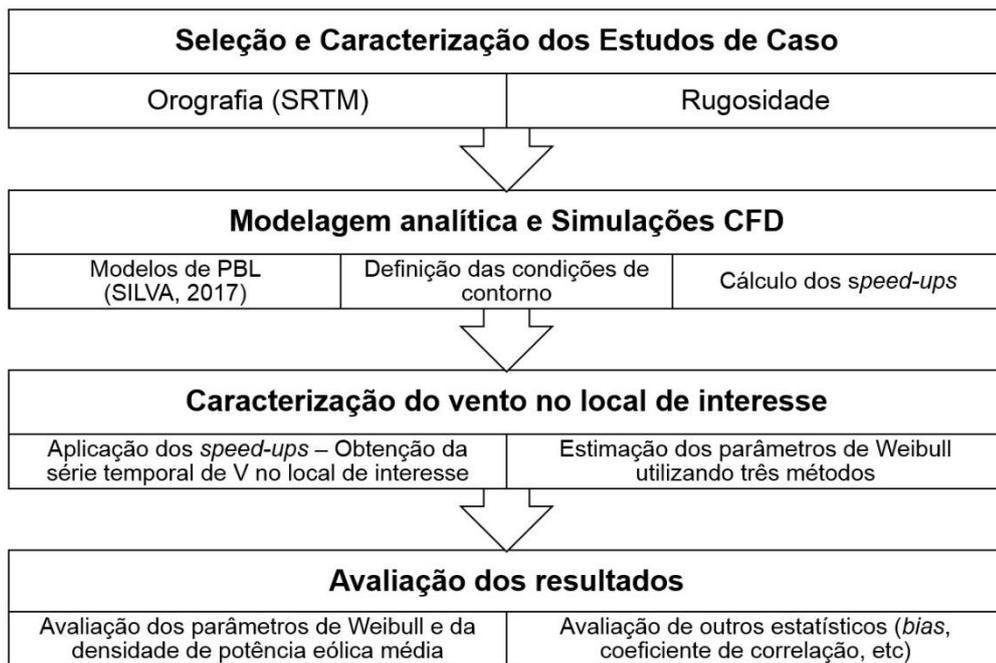
complexos, oferece, de forma geral, resultados mais acurados que àqueles de modelos comerciais linearizados, como o WAsP (POLITIS et al., 2012).

O presente trabalho, por sua vez, pretende utilizar a modelagem de Camada Limite Planetária, abordada por Silva (2017), no contexto de simulações CFD, aplicando-a em locais com orografia simples (Paracuru-CE) e complexa (Triunfo-PE). Diferente dos trabalhos que utilizam saídas de um modelo mesoescalar como entrada para os modelos CFD, este trabalho utiliza saídas de um modelo macroescalar (GCM), excluindo a necessidade de uma simulação mesoescalar, e, portanto, diminuindo o custo computacional envolvido. Vale mencionar que as saídas de GCMs alimentam as simulações mesoescalares. Logo, esta metodologia exclui uma etapa do processo, fazendo um *downscaling* da macroescala direto para microescala.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia proposta para este trabalho pode ser resumida nas etapas mostradas na Figura 9. Primeiramente, foram escolhidos os estudos de caso e obtidas as geometrias que caracterizam a orografia deles. Em seguida, foram utilizados os modelos de PBL para caracterizar o vento no local de interesse e para obter a condição de contorno de velocidade para as simulações CFD. Com as séries temporais de velocidade do vento provenientes das duas abordagens usadas neste trabalho, foram inferidos os respectivos fatores de Weibull das duas séries e comparados com os fatores de Weibull da série temporal de dados observacionais. A seguir, tem-se o detalhamento de cada uma das etapas.

Figura 9 - Principais etapas da metodologia empregada no trabalho



Fonte: O Autor (2020).

### 4.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO

Dado que um dos objetivos deste trabalho é avaliar o desempenho da metodologia proposta em locais com características orográficas distintas, foi escolhido um local com orografia simples (Paracuru-CE) e um com orografia complexa (Triunfo-PE), em função de trabalhos anteriores realizados no Centro de Energias Renováveis da Universidade Federal de Pernambuco (CER-UFPE) que

fizeram uso de dados observacionais públicos provenientes de várias fontes, tais como, por exemplo, a Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA-CE) e o Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais (SONDA), administrado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Ao longo do texto, esses dois locais escolhidos, Paracuru e Triunfo, poderão ser referenciados por suas respectivas siglas, PCR e TRI. Alguns metadados desses locais estão especificados na Tabela 1.

Tabela 1- Metadados dos estudos de caso

Local	Localização	Cobertura temporal dos dados	Altura de medição (A.G.L.)	Orografia	Fonte
Paracuru-CE	03° 24' 42,4" S, 38° 59' 02,8" O	Ago/2004 – Mai/2006	60 m	Simples	SEINFRA-CE
Triunfo-PE	07° 49' 38" S, 38° 07' 20" O	Jul/2004 – Abr/2007	50 m	complexa	SONDA

Fonte: O Autor (2020).

\* A.G.L., *Above Ground Level*

Os dados de PCR e TRI apresentam um intervalo de integração de 10 min, mas foram convertidos em médias de 6 horas, para fins de sincronização com os dados do GCM, que possuem um *time-step* de 6 horas.

Uma vez selecionados os estudos de caso, é preciso obter as geometrias representativas da orografia de cada um, que, neste caso, foram obtidas a partir de modelos digitais de terreno fornecidos pela base de dados do programa SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA, os quais apresentam uma resolução de aproximadamente 30 m (AZEVEDO, 2013). Os modelos digitais de terreno podem ser descarregados, por exemplo, em formato TIF (*Tagged Image File*) e precisam ser convertidos para o formato STL (*Stereolithography*), que é o formato compatível com o OpenFOAM. Essa conversão pode ser feita por *softwares* de geoprocessamento como, por exemplo, QGIS ou *GlobalMapper*. Com isso, a caracterização orográfica dos locais está pronta e tais geometrias podem ser utilizadas nas simulações em seguida.

A fim de determinar a complexidade orográfica dos locais estudados de forma quantitativa, foi utilizado o parâmetro RIX (*Ruggedness Index*), o qual identifica a

porcentagem de terreno que apresenta valores de declividade mais elevados que um valor crítico, comumente 30% (WOOD, 1995). Segundo o guia do usuário da ferramenta computacional WASP, pode-se caracterizar um terreno como simples ou plano quando ele apresenta um RIX de 0%, mais complexo com RIX até 10% e montanhoso com RIX acima de 10%.

Além da caracterização orográfica, é preciso também definir os estudos de caso com respeito à rugosidade aerodinâmica do solo. Isso é feito ao descrever o uso do solo em cada região, que, por sua vez, está relacionado a um valor médio de rugosidade. Locais com vegetação rasteira, por exemplo, apresentam valores baixos de rugosidade. Enquanto centros urbanos apresentam valores de rugosidade elevados. Essa relação entre uso do solo e rugosidade aerodinâmica do solo pode ser vista em Silva et al. (2007), por exemplo.

## 4.2 MODELAGEM ANALÍTICA E SIMULAÇÕES CFD

### 4.2.1 Modelagem analítica

A modelagem analítica da Camada Limite Planetária (Planetary Boundary Layer, PBL) apresentada neste trabalho foi totalmente baseada no trabalho de Silva (2017). Os modelos abordados por ele podem ser divididos nas seguintes categorias principais: a) modelos que consideram o gradiente vertical de temperatura; b) modelos que consideram o gradiente horizontal de temperatura; c) modelos que consideram ambos gradientes de temperatura; d) modelos de regime neutro, sem gradiente de temperatura. Além dos modelos correspondentes às categorias citadas, ele abordou também modelos que utilizam ajustes estatísticos para definição de alguns parâmetros. Em sua dissertação, o estudo de caso 2 coincide com PCR. Para esse local, o modelo puramente físico que obteve melhor resultado foi o LGRN-VT, que foi comentado na seção 2.6. Vale mencionar que a performance de seus modelos foi baseada no valor do *skillscore* de quarta potência (SS4) de cada um deles, o estatístico apresentado por Taylor (2001), que depende do coeficiente de correlação ( $\rho$ ) e da razão dos desvios-padrão do modelo e da observação ( $\hat{\sigma}$ ):  $SS4 =$

$$\frac{(1+\rho)^4}{4(\hat{\sigma}+1/\hat{\sigma})^2}$$

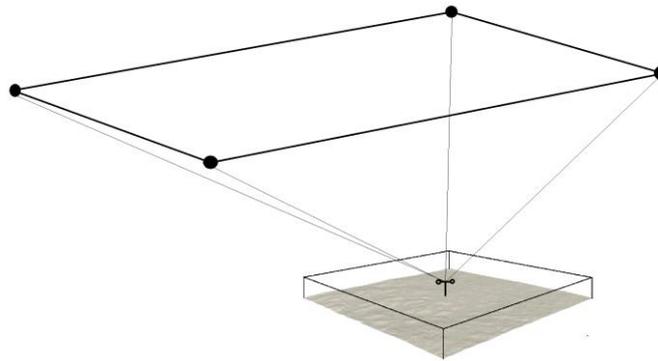
Todos os modelos tratados por Silva (2017) têm, como entrada, dados referentes à interpolação bilinear (IBL) dos 4 pontos de malha do GCM mais próximos à posição da torre anemométrica (ver Figura 10), considerando-se apenas os 4 pontos pertencentes ao nível vertical (da malha tridimensional do GCM) que apresentou o melhor SS4, i.e., o SS4 que mais se aproximou do valor máximo para tal *skill score* (1). Contudo, como o SS4 não traz informações sobre o viés (*bias*) do modelo, foi escolhido para este trabalho o nível vertical com melhor (neste caso, o menor) RMSE e não, o melhor (neste caso, o maior) SS4. As séries temporais de saída dos modelos e a série temporal de dados observacionais foram divididas em dois subconjuntos: o de calibração (para a inferência de parâmetros dos modelos) e o de validação (para a avaliação da performance dos modelos). Esses dois subconjuntos apresentam o mesmo comprimento, sendo os dados dos dias ímpares pertencentes à série de calibração e os dados dos dias pares, à série de validação. Considerando-se que as séries temporais são relativamente curtas, a divisão dos subconjuntos em dias alternados (dias ímpares para calibração; dias pares para validação) é feita para que as estações do ano estejam igualmente representadas em ambos conjuntos.

O caso de Triunfo não foi abordado por Silva (2017). Mas, aplicando sua metodologia a TRI, observou-se que o modelo LGRN-VT também foi um dos modelos puramente físicos com melhor desempenho. Logo, para simplificar a análise, o modelo LGRN-VT foi o modelo escolhido para a análise deste trabalho nos dois casos, PCR e TRI. O modelo LGRN-VT pode ser entendido como um modelo híbrido, que utiliza uma abordagem não neutra para o cálculo da magnitude do vento geostrófico (a partir de gradientes horizontais de temperatura) e, por outra parte, a lei logarítmica (representando o regime neutro) para o cálculo da velocidade do vento horizontal em superfície tal como visto na seção 2.6. Com a saída do modelo para a altura de medição da torre anemométrica, já é possível avaliar o desempenho da modelagem analítica ao representar o vento na posição da torre.

Por outro lado, a utilização do modelo LGRN-VT no âmbito de simulações CFD se deu da seguinte forma: o modelo foi aplicado para 11 alturas (10, 20, 30, 50, 60, 100, 150, 200, 500, 800 e 1000 metros sobre o nível do solo), obtendo-se uma série temporal para cada uma delas, tendo como alvo a posição do *inlet* do domínio computacional (ver Figura 11). Nas séries temporais correspondentes às alturas de medição (60 m em PCR e 50 m em TRI), foram verificadas quais eram os setores

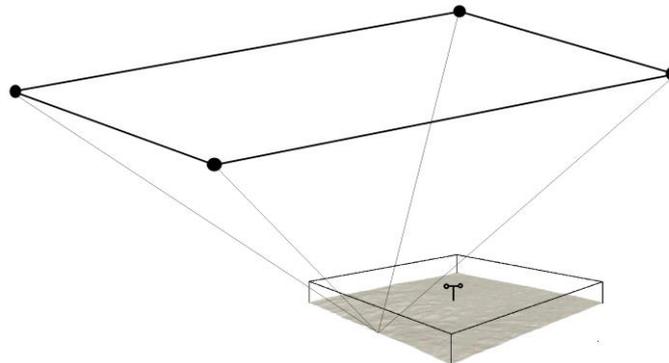
predominantes em cada caso. Em PCR, os setores predominantes foram aqueles centrados em 45°, 90° e 135°. Em TRI, foram aqueles centrados em 0°, 45°, 90° e 135°. De forma a obter uma economia com respeito ao custo computacional (limitando-se o número de casos simulados) sem impacto significativo sobre a acurácia dos resultados, escolheu-se trabalhar apenas com os setores predominantes citados anteriormente, dado que a ocorrência dos demais setores era muito baixa (com nenhuma ocorrência em PCR e menos de 7 % em TRI, como será visto na seção 5). Foram gerados, portanto, perfis verticais de velocidade referentes a esses setores (3 perfis em PCR e 4 perfis em TRI). Tais perfis foram definidos da seguinte maneira: tomando como exemplo o caso de PCR, para gerar o perfil vertical de velocidade referente a 45°, em cada uma das séries temporais das 11 alturas para as quais foi aplicado o modelo LGRN-VT, foram considerados apenas os instantes em que o vento apresentava direção correspondente ao setor centrado em 45° e, então, foram calculadas as médias aritméticas correspondentes a cada uma das alturas. Isso resultou em 11 valores médios de magnitude da velocidade do vento referentes ao setor centrado em 45°. Então, por meio de uma regressão polinomial baseada em mínimos quadrados, foi ajustada uma curva representando, dessa forma, um perfil vertical de velocidade do vento para esse setor. O mesmo foi feito com os demais setores predominantes. Assim sendo, foram criados perfis verticais de velocidade para cada setor predominante, que foram então utilizados como condição de contorno nas simulações CFD (ver Figura 11). Além disso, o valor da velocidade de fricção  $u_*$  calculado pelo modelo foi utilizado para definir as condições de contorno para energia cinética turbulenta  $k$  e taxa de dissipação da energia cinética turbulenta  $\varepsilon$ , dadas pelas equações 18 e 19, que serão apresentadas na subseção seguinte.

Figura 10 - Utilização dos dados do GCM pelo modelo LGRN-VT para representar o vento na posição da torre anemométrica (destacam-se apenas os 4 pontos da malha do GCM correspondentes ao nível vertical que proporciona o menor RMSE)



Fonte: O Autor (2020).

Figura 11- Utilização dos dados do GCM pelo modelo LGRN-VT para obter a condição de contorno de velocidade do vento nas simulações CFD (destacam-se apenas os 4 pontos da malha do GCM correspondentes ao nível vertical que proporciona o menor RMSE)



Fonte: O Autor (2020).

## 4.2.2 Simulações CFD

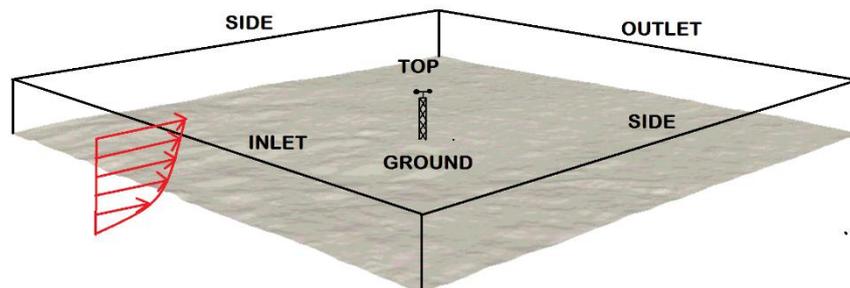
Em se tratando das simulações CFD, elas seguem as etapas mostradas na Figura 2: pré-processamento, solução (ou solucionador) e pós-processamento. A seguir, serão discutidas cada uma delas.

### 4.2.2.1 Pré-processamento

Nesta etapa, foram criadas as malhas a partir das geometrias obtidas anteriormente com os modelos digitais de terreno. Os geradores de malha utilizados foram o *terrainBlockMesher*, gerador voltado para fluxos atmosféricos sobre terrenos (SCHIMIDT et al., 2012; PERALTA et al., 2014; UPNERE et al., 2018), e o *snappyHexMesher*, gerador próprio do OpenFOAM. A fim de verificar a qualidade

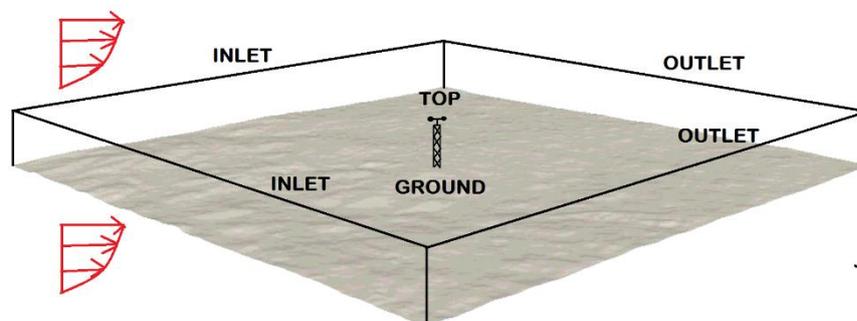
das malhas geradas, utilizou-se a aplicação *checkMesh* do OpenFOAM. O domínio computacional foi definido de acordo com as ordens de grandeza tipicamente empregadas em publicações sobre simulação de fluxos atmosféricos, que são de alguns quilômetros na direção x e y e de algumas centenas de metros na direção z (BALOGH et al., 2012; AZEVEDO, 2013; PERALTA et al., 2014). Com respeito às direções do vento, foram adotados 8 setores de 45°. Para simulações de ventos soprando dos setores 0°, 90°, 180° e 270°, ou seja, setores perpendiculares às fronteiras (faces) do domínio computacional, foi adotada a definição das fronteiras mostradas na Figura 12. Já para os setores 45°, 135°, 225° e 315°, foi adotada a definição das fronteiras mostradas na Figura 13. A diferença é que, no último caso, não existem fronteiras paralelas ao fluxo (*sides*), havendo dois *inlets* e dois *outlets* (HANG et al., 2013; RADÜNZ et al., 2020). Os perfis em vermelho indicam o vento na entrada do domínio.

Figura 12- Definição das fronteiras para ventos dos setores 0°, 90°, 180° e 270°



Fonte: O Autor (2020).

Figura 13- Definição das fronteiras para ventos dos setores 45°, 135°, 225° e 315°



Fonte: O Autor (2020).

A Tabela 2 mostra as condições de contorno associadas às fronteiras descritas nas Figuras 12 e 13 (UPNERE et al., 2018).

Tabela 2- Condições de contorno

Fronteira	Descrição
Inlet (entrada)	U: perfil baseado no modelo LGRN-VT. $k$ e $\varepsilon$ : bibliotecas <i>atmBoundaryLayerInletK</i> e <i>atmBoundaryLayerInletEpsilon</i> do próprio OpenFOAM, que consideram as expressões propostas por Richards e Hoxey (1993) (equações 18 e 19). p: condição de <i>zeroGradient</i> <sup>1</sup> .
Outlet (saída)	p = 0, e condição de <i>zeroGradient</i> para as demais variáveis.
Top (topo do domínio)	Condição <i>slip</i> <sup>2</sup> para U, $k$ e $\varepsilon$ .
Ground (terreno)	U = (0,0,0) (não-deslizamento), e as funções de parede <i>kqRWallFuncion</i> , <i>epsilonWallFuncion</i> , e <i>nutkAtmRoughWallFuncion</i> , para $k$ , $\varepsilon$ , e $\nu_t$ , respectivamente.
Sides (paralelos ao fluxo)	Condição <i>slip</i> para U, $k$ e $\varepsilon$ .

Fonte: O Autor (2020).

<sup>1</sup> o valor da variável na fronteira é igual ao valor na célula adjacente (gradiente normal nulo).

<sup>2</sup> a componente normal é anulada, e as componentes tangenciais são mantidas.

As expressões propostas por Richards e Hoxey (1993) para  $k$  e  $\varepsilon$  são as seguintes:

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (18)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z + z_0)} \quad (19)$$

Com relação aos parâmetros de simulação, foram estabelecidas tolerâncias de  $10^{-2}$  para pressão, e  $10^{-3}$  para U,  $k$  e  $\varepsilon$  (AZEVEDO, 2013). Além disso, foi escolhido um número máximo de iterações de 5000 para garantir que as simulações alcançassem a convergência. As simulações foram realizadas de forma paralela no

*cluster* do Centro de Energias Renováveis (CER-UFPE), utilizando 16 cores para cada simulação. A configuração da paralelização no OpenFOAM é feita através do arquivo *decomposeParDict*, localizado na pasta *system*, no qual é possível selecionar a quantidade de subdomínios a serem gerados, e o método de decomposição (*simple*, *hierarchical*, *scotch* ou *manual*). Embora não seja o método mais eficiente, para as simulações deste trabalho, foi escolhido o método *simple*. Para problemas mais complexos, e com um número maior de células, é aconselhável usar, portanto, um método que deixe mais eficiente a troca de informações entre os processadores, como o *scotch*. Antes de passar para a etapa seguinte, foi definido o ponto de interesse no domínio no qual deseja-se extrair o resultado após as simulações. Para fins de validação, esse ponto coincide com a posição do anemômetro.

#### 4.2.2.2 Solução

Com todos os parâmetros de simulação configurados, tem-se então a solução do problema através de um *solver*. O *solver* que foi utilizado nas simulações é o *simpleFoam*, que é indicado para escoamentos incompressíveis, turbulentos, e em regime estacionário (PERALTA et al., 2014). Tal *solver* é baseado no método *SIMPLE* de acoplamento pressão-velocidade. Como um dos objetivos do trabalho é avaliar o desempenho das simulações com respeito ao modelo de turbulência adotado, foram utilizadas três variações do modelo k-epsilon: k-epsilon padrão, k-epsilon atmosférico, e *realizable* k-epsilon, e, para o local com orografia complexa, devido à presença de gradientes de pressão mais acentuados, foi usado também o modelo k-omega. Verificada a convergência das simulações, tem-se então a etapa de pós-processamento dos resultados.

#### 4.2.2.3 Pós-processamento

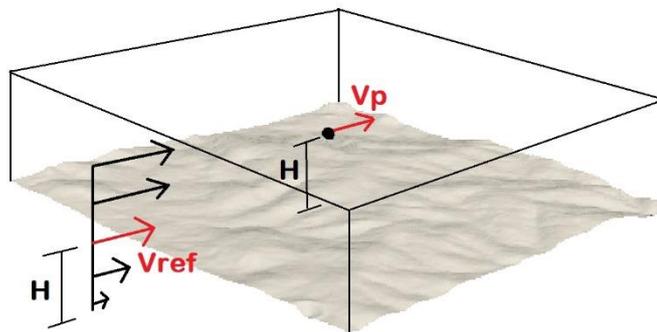
Em um caso geral, em que são utilizados vários perfis de velocidade como condição de contorno, para cada combinação de magnitude e direção do vento imposta como entrada das simulações CFD, é extraído o valor da velocidade do vento simulada na posição da torre anemométrica. Com isso, é possível estabelecer os chamados *speed-ups*, que representam a variação percentual da velocidade do

vento no ponto p de interesse com relação à velocidade imposta na entrada, ambas a mesma altura, que neste caso, é a altura de medição (MILLER; DAVENPORT, 1998). Logo, chamando o valor da velocidade na entrada de  $V_{ref}$ , o *speed-up* é dado por:

$$\Delta V = \frac{V_p - V_{ref}}{V_{ref}} \quad (20)$$

Dito isso, os *speed-ups* são os principais resultados obtidos no pós-processamento, expressando quantitativamente a influência da topografia e rugosidade no vento local (BADGER et al., 2014). A Figura 14 ilustra as grandezas envolvidas no cálculo dos *speed-ups*. Nela, a altura H representa a altura onde se encontra o anemômetro. A Tabela 3 ilustra um caso hipotético em que foram simuladas nove condições de vento (com três valores de magnitude e três de direção). Os elementos internos da tabela representam os *speed-ups* calculados para cada combinação de V e D. Neste trabalho, porém, uma vez que se propõe a utilizar apenas o perfil vertical médio de velocidade para cada direção, proveniente do modelo LGRN-VT, não haverá o grau de liberdade com respeito à magnitude, sendo então calculado um único *speed-up* por direção.

Figura 14- Grandezas envolvidas no cálculo do *speed-up*



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 3 - *Speed-ups* calculados para diferentes condições de vento

	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>
<b>D1</b>	$\Delta V_{V1D1}$	$\Delta V_{V2D1}$	$\Delta V_{V3D1}$
<b>D2</b>	$\Delta V_{V1D2}$	$\Delta V_{V2D2}$	$\Delta V_{V3D2}$
<b>D3</b>	$\Delta V_{V1D3}$	$\Delta V_{V2D3}$	$\Delta V_{V3D3}$

Fonte: O Autor (2020).

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO VENTO NO LOCAL DE INTERESSE

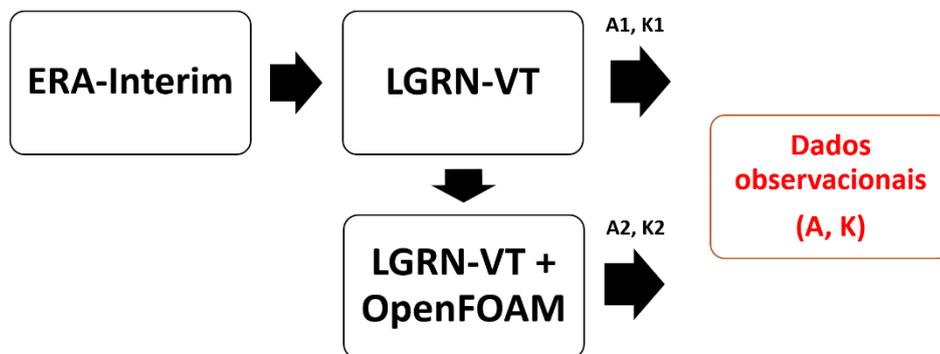
A metodologia empregada neste trabalho assume que a série temporal gerada pelo modelo analítico LGRN-VT representa o vento nas redondezas da torre anemométrica. Mais especificamente, na entrada do domínio computacional. Baseando-se nessa série temporal, foram definidos alguns casos para simular, selecionando as direções mais frequentes. Isso é feito para evitar simular cada condição de vento dada pela saída do modelo, o que resultaria em um custo computacional mais elevado, e possivelmente, não necessário.

Logo, para obter a série temporal do vento no local de interesse, foram aplicados à série temporal de saída do modelo analítico os *speed-ups* calculados com as simulações CFD. Dessa forma, os efeitos topográficos e de rugosidade são introduzidos na série temporal, passando a representar o vento na posição de interesse. Para exemplificar, tomemos como base as informações contidas na Tabela 3. Considerando que em um dado momento, o vento informado pelo modelo analítico apresenta magnitude  $V2$  e direção  $D1$ . O *speed-up* associado a essa combinação é  $\Delta V_{V2D1}$ . Logo, o vento observado no ponto  $p$ , nesse instante, seria dado por:  $V_p = V2 \cdot (1 + \Delta V_{V2D1})$ . Essa operação é feita para todos os instantes da série temporal que apresentam as mesmas direções simuladas, gerando uma nova série para o vento no ponto  $p$ . Nos instantes em que ocorrem as direções menos frequentes, que não foram simuladas, foram repetidos os valores de velocidade da série temporal original do modelo analítico. Assim, a grande maioria dos dados da série temporal da modelagem com CFD difere-se dos dados originais da série do modelo analítico por fatores multiplicativos, *speed-ups*, e alguns poucos dados acabam sendo os mesmos em ambas séries.

Com isso feito, tem-se três séries temporais de velocidade do vento: a série com dados observacionais, a série de saída do modelo LGRN-VT, e a série obtida

com a modelagem CFD. Para cada uma delas, é possível calcular seus respectivos parâmetros de escala e de forma de Weibull. O objetivo do trabalho, portanto, é verificar se a metodologia usada, empregando CFD, oferece melhorias com respeito à modelagem analítica de camada limite planetária. Isso pode ser feito ao avaliar qual das séries temporais apresenta fatores de Weibull ( $A_1, K_1$ , ou  $A_2, K_2$ ) mais próximos daqueles referentes à série temporal de observação ( $A, K$ ), ou avaliar outros parâmetros estatísticos, como será abordado na seção seguinte. Um esquema desse processo é mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Resumo do processo de obtenção dos parâmetros de Weibull pelas abordagens “LGRN-VT” e “LGRN-VT + OpenFOAM”



Fonte: O Autor (2020).

Dessa forma, o vento no local de interesse está caracterizado pela sua série temporal, e pela função de densidade de probabilidade de Weibull.

#### 4.4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para a avaliação dos resultados, são tomadas as séries temporais de validação. Aquelas com dados referentes aos dias pares, como mencionado na seção 4.2.1. Com respeito à estimação dos parâmetros de Weibull de cada uma das séries, foram escolhidos três dos sete métodos de estimação apresentados por Rocha et al. (2012): o método iterativo de máxima verossimilhança, o método do fator de energia padrão, e um método empírico. A seguir, são demonstradas as formas de estimação dos parâmetros de Weibull por cada um desses métodos.

### Método da máxima verossimilhança

$$K = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n v_i^K \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^K} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (21)$$

$$A = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^K \right)^{\frac{1}{K}} \quad (22)$$

onde  $v_i$  é a velocidade do vento no *timestep*  $i$ , e  $n$  é o número de dados com velocidades não nulas.

### Método do fator de energia padrão

Este método utiliza o fator de energia padrão, definido pela equação 23, e os parâmetros de forma e escala de Weibull são então dados pelas equações 24 e 25, respectivamente.

$$E_{pf} = \frac{\bar{v}^3}{\bar{v}^3} \quad (23)$$

$$K = 1 + \frac{3.69}{(E_{pf})^2} \quad (24)$$

$$A = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)} \quad (25)$$

onde  $\Gamma$  representa a função gamma, definida por:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (26)$$

## Método empírico

$$K = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad (27)$$

$$A = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)} \quad (28)$$

onde  $\sigma$  é o desvio padrão da série temporal de velocidade.

Aplicando um desses métodos, é possível avaliar qual das modelagens é capaz de representar melhor os fatores de Weibull da série de observação. Utilizando os três métodos, será possível também verificar se a escolha do método de estimação dos parâmetros interfere na comparação do desempenho dos modelos. Além de uma análise global dos parâmetros de Weibull, utilizando toda a série temporal para o cálculo, também será feita uma análise por setor, utilizando apenas os instantes em que o vento sopra de uma determinada direção.

Uma forma complementar de avaliar o desempenho dos modelos é através do cálculo de estatísticos como *Bias*, Coeficiente de correlação ( $\rho$ ), Razão dos desvios-padrões ( $\hat{\sigma}$ ), e RMSE (*Root Mean Squared Error*), descritos a seguir.

$$Bias = \overline{U_m} - \overline{U_{obs}} \quad (29)$$

$$\rho = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{m,i} - \overline{U_m})(U_{obs,i} - \overline{U_{obs}})}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{m,i} - \overline{U_m})^2\right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{obs,i} - \overline{U_{obs}})^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (30)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\sigma_m}{\sigma_{obs}} \quad (31)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(U_{m,i} - U_{obs,i})^2}{N}} \quad (32)$$

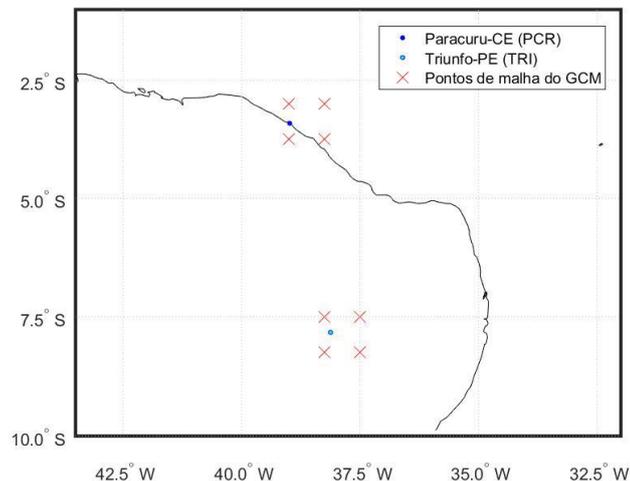
onde  $N$  é o número de amostras,  $\overline{U_m}$  é a média das velocidades do modelo,  $\overline{U_{obs}}$  é a média das velocidades observadas,  $U_{m,i}$  é a velocidade do modelo no instante  $i$ ,  $U_{obs,i}$  é a velocidade observada no instante  $i$ ,  $\sigma_m$  é o desvio-padrão do modelo, e  $\sigma_{obs}$  é o desvio-padrão da observação. É interessante mencionar os valores desejáveis para cada estatístico. O melhor modelo é aquele com o *Bias* mais próximo de zero, representando bem o comportamento médio do vento, com coeficiente de correlação mais próximo de um, com uma razão dos desvios mais próxima de um, representando bem a dispersão em torno da média, e um RMSE mais próximo de zero.

Em resumo, ao avaliar os erros nas estimativas dos parâmetros de Weibull, e os valores dos estatísticos supracitados, tem-se uma análise bastante completa da performance da metodologia proposta neste trabalho.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma a visualizar a localização dos dois estudos de caso tratados neste trabalho, a Figura 16 mostra a posição da torre anemométrica do primeiro estudo de caso, PCR, com o ponto em azul mais escuro ao alto, e a posição da torre do segundo estudo de caso, TRI, em azul mais claro abaixo. Os “X” em vermelho indicam a posição dos quatro pontos de malha do GCM mais próximos às posições das respectivas torres anemométricas.

Figura 16 - Localização das torres anemométricas de PCR e TRI, e dos pontos de malha do GCM mais próximos às posições dessas torres



Fonte: O Autor (2020).

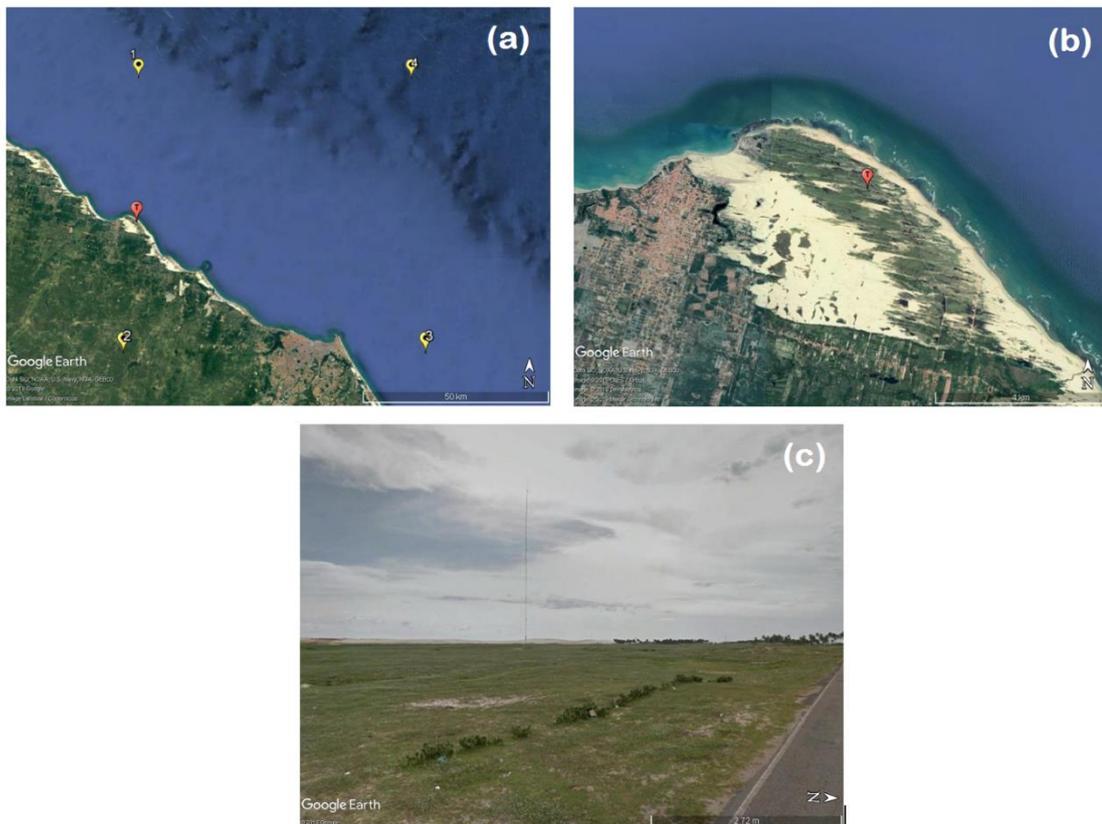
A seguir, tem-se o detalhamento dos resultados obtidos para cada estudo de caso.

### 5.1 RESULTADOS EM PARACURU-CE (PCR)

A Figura 17, a seguir, auxilia na caracterização do estudo de caso. Na Figura 17a, o marcador vermelho indica a localização da torre anemométrica utilizada para validação dos resultados. Os marcadores em amarelo representam as localizações dos 4 pontos de malha do GCM mais próximos à posição da torre anemométrica. Os dados desses pontos de malha foram interpolados bilinearmente em função das distâncias para a posição da torre, e utilizados como entrada no modelo analítico

LGRN-VT. A Figura 17b apresenta uma vista ampliada em torno da posição da torre, indicando a proximidade com o mar. Já a Figura 17c mostra uma vista no nível do solo, indicando o tipo de vegetação presente, que neste caso, são predominantemente gramíneas. Logo, o valor escolhido para a rugosidade foi de 0,01 m (CHANG et al., 2015).

Figura 17 - Localização da torre anemométrica de Paracuru-CE e dos pontos de malha do GCM mais próximos



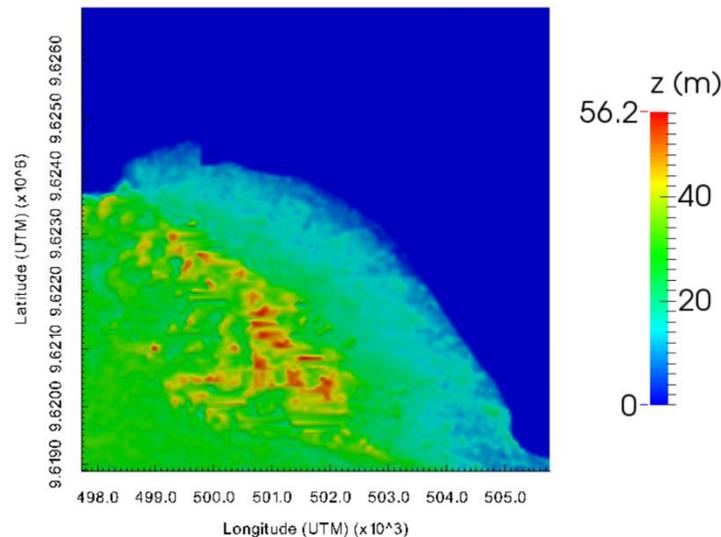
Fonte: O Autor (2020).

### 5.1.1 Caracterização topográfica e do regime de vento

A caracterização topográfica do local pode ser vista através do mapa de elevação mostrado na Figura 18. A torre anemométrica está localizada no centro desse mapa. Nele, nota-se que o local é relativamente plano, com uma variação máxima de elevação de cerca de 56 metros. Esse mapa foi gerado com a ferramenta de visualização ParaView, a partir da geometria que foi utilizada no trabalho. A fim de quantificar a complexidade topográfica do local, utilizou-se o *WAsP MapEditor* v11, uma ferramenta gratuita do *WAsP*, para calcular o RIX, obtendo-se um RIX global médio de 0,06 %, bastante próximo do RIX nulo que

caracteriza um local com terreno plano, como visto anteriormente. Vale mencionar que todas as direções simuladas apresentaram um RIX muito próximo de 0 %, e foi considerado o valor de 30 % para a declividade crítica nos cálculos.

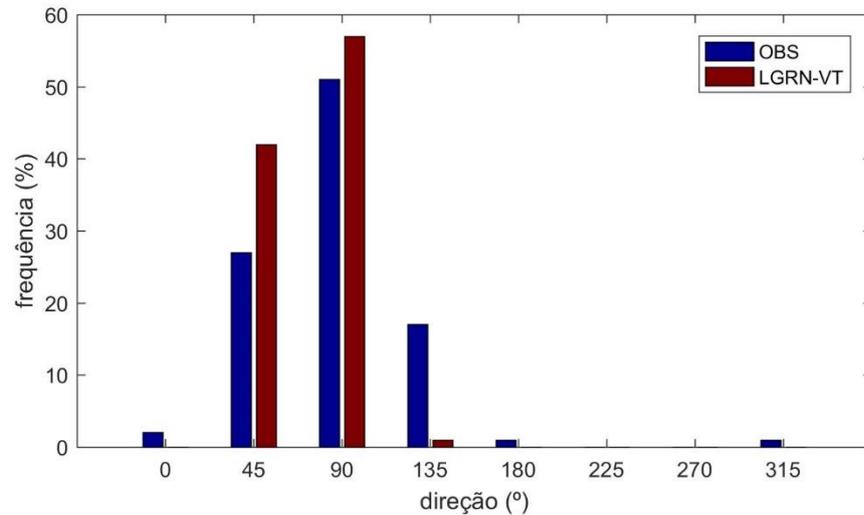
Figura 18- Mapa de elevação de Paracuru-CE



Fonte: O Autor (2020).

Para a caracterização do regime de vento local, foi gerado o histograma de direção do vento (Figura 19), com os resultados do modelo LGRN-VT e os valores medidos no período de validação. Segundo o modelo analítico, usado como referência para as definições de condição de vento, as direções predominantes foram  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , e  $135^\circ$ , e as magnitudes médias em cada uma delas foram 10,75 m/s, 11,91 m/s, e 13,93 m/s, respectivamente. Essas magnitudes médias são as chamadas velocidades de referência que são utilizadas no cálculo dos *speed-ups*. Dado que neste estudo de caso há uma predominância bastante marcada das três direções mencionadas, especialmente  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , escolheu-se simular apenas esses três casos. Vale mencionar que, para esse caso, embora o modelo não tenha obtido uma representação tão satisfatória das frequências de ocorrência das direções, as três direções predominantes do modelo coincidem com as direções observadas.

Figura 19- Histograma de direção do vento no período de validação



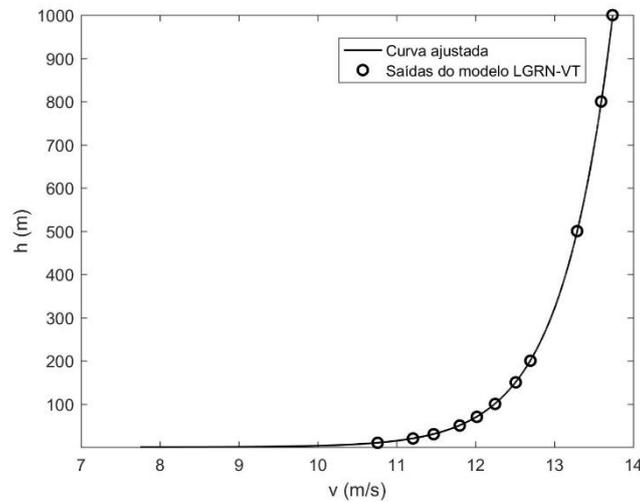
Fonte: O Autor (2020).

### 5.1.2 Definição da condição de contorno da velocidade

O resultado mostrado na Figura 19 é referente à saída do modelo para a altura de medição (60 m). Para definir os perfis verticais de velocidade a serem usados como condições de contorno nas simulações, foi aplicado o modelo LGRN-VT para as alturas de 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 500, 800, e 1000 metros. Para exemplificar, a Figura 20 mostra os valores médios calculados para cada altura, e a curva ajustada para esses pontos, para a direção de 90°. Vale mencionar que as células em contato com a geometria têm uma altura de aproximadamente 1 metro, seguindo o requisito apontado por Blocken et al. (2007), de que tais células devem ser maiores que o comprimento da rugosidade, para evitar incoerência física. Além disso, o fato dessas primeiras células apresentarem uma altura de aproximadamente 1 metro evita a divergência da curva de ajuste, representada pela equação 33, para valores de  $h$  muito próximos de zero.

$$v = 9,25 + 0,65 \ln(h) \quad (33)$$

Figura 20- Perfil vertical de velocidade referente à direção de 90° usado como condição de contorno em PCR

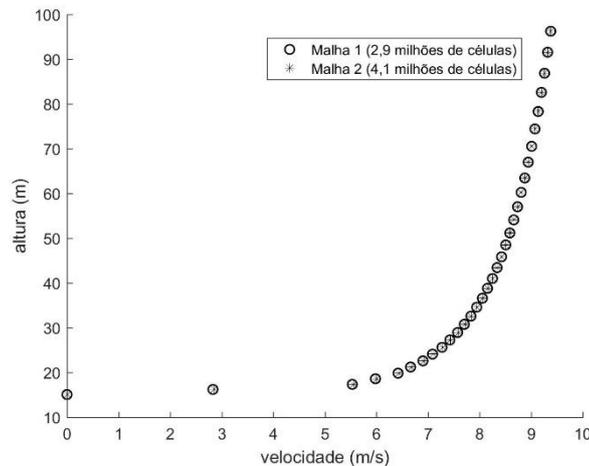


Fonte: O Autor (2020).

### 5.1.3 Dependência de malha

Em se tratando das dimensões do domínio computacional para as simulações CFD, tanto em PCR como em TRI, o domínio tem 8 km em x, 8 km em y, e 1 km em z. Para este caso de PCR, foram geradas duas malhas: uma com 2,9 milhões de células e resolução horizontal de 30 metros, e outra com 4,1 milhões de células e resolução horizontal de 25 metros. Com relação à resolução vertical, ambas apresentam a célula mais próxima da superfície com cerca de 1 metro e um *grading factor* de 40. Ou seja, a partir dessa primeira célula, há uma expansão gradativa nas alturas das células adjacentes, de modo que a razão entre a altura da célula do topo do domínio, e a altura da célula mais próxima à superfície é 40. Para avaliar os resultados obtidos com essas duas malhas, foram extraídos os perfis de velocidade em um ponto do domínio, e verificou-se que não houve variação significativa no perfil, como mostra a Figura 21. Logo, a malha mais grossa, com 2,9 milhões de células, foi escolhida para ser utilizada nas simulações, dado que ela exige um menor poder computacional.

Figura 21 - Análise de dependência de malha



Fonte: O Autor (2020).

Vale destacar que as duas malhas mencionadas diferem apenas em suas resoluções horizontais. Seria interessante avaliar também malhas com resoluções verticais distintas. Várias tentativas foram realizadas nesse sentido, mas ao variar a resolução vertical das malhas, houve um comprometimento da qualidade das mesmas. Portanto, assumiu-se que a malha escolhida era suficiente para a solução do trabalho.

Ao utilizar a aplicação *checkMesh* do OpenFOAM, foram obtidos os seguintes valores para os parâmetros de qualidade de malha: *aspect ratio* máximo de 17,05, *orthogonality* média de 2,77° com máxima de 47,42°, e *skewness* máximo de 0,79. Todos dentro dos limites de qualidade da malha.

#### 5.1.4 Simulações

Com uma malha com qualidade satisfatória e tendo definido as condições de vento a serem simuladas, foram realizadas então as simulações com os três modelos de turbulência citados anteriormente. Optou-se por usar 16 núcleos de processamento nas simulações, tanto em PCR como em TRI, de acordo com a análise de escalabilidade mostrada no final dessa seção. Os *speed-ups* obtidos para PCR estão mostrados na Tabela 4.

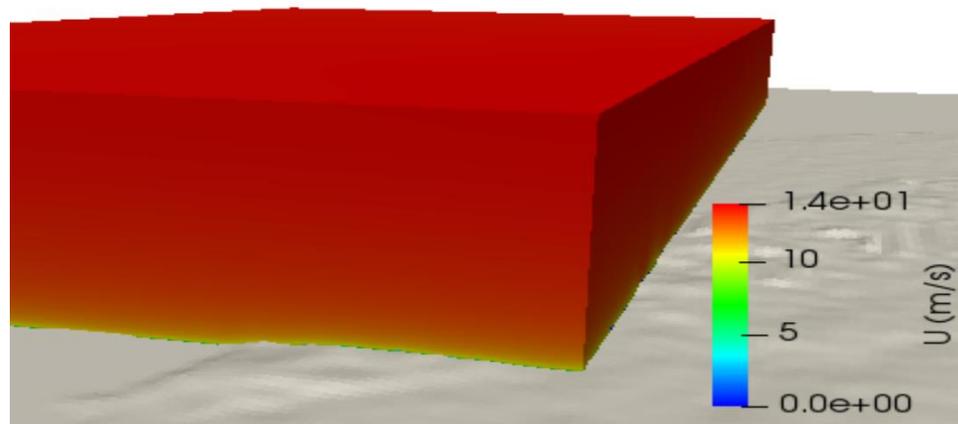
Tabela 4- Speed-ups para diferentes condições de vento (em PCR)

Modelo de turbulência	45°	90°	135°
k-epsilon padrão	- 0,2 %	+ 1,5 %	- 0,2 %
k-epsilon atmosférico	- 0,8 %	+ 1,3 %	- 0,6 %
Realizable k-epsilon	+ 0,8 %	+ 2,4 %	+ 0,9 %

Fonte: O Autor (2020).

A partir dos resultados mostrados da Tabela 4, nota-se que as magnitudes dos *speed-ups* calculados são pequenas, com valor máximo de 2,4 %. Esse comportamento era esperado, visto que, por se tratar de um local plano e sem variação de rugosidade, a velocidade do vento sofre pouca mudança ao longo do domínio. A Figura 22 mostra um corte com a magnitude do vento simulado. Nela, é possível notar uma fina camada limite, confirmando a pouca influência da topografia no vento, neste caso.

Figura 22- Corte com a magnitude U (em m/s)



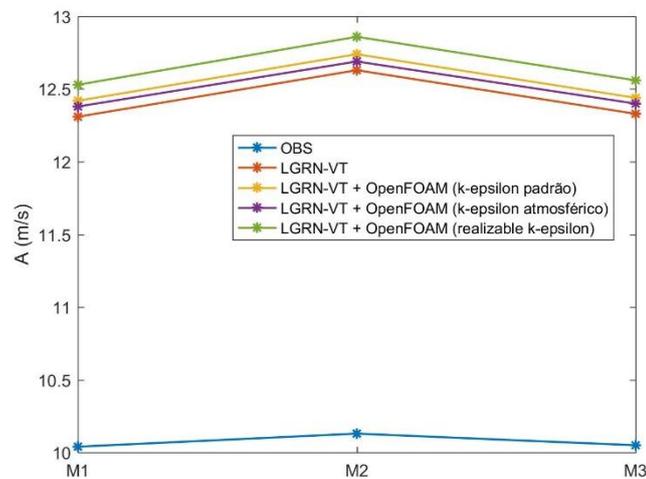
Fonte: O Autor (2020).

### 5.1.5 Estimação dos parâmetros de Weibull

Uma vez aplicados os *speed-ups*, obtidos com as simulações, à série temporal do modelo LGRN-VT, é gerada então a série temporal da modelagem com CFD, que será indicada, daqui pra frente, como “LGRN-VT+OpenFOAM”. A série temporal do modelo analítico será referenciada como “LGRN-VT”, e a série dos dados observacionais como “OBS”. As informações mostradas nas Figuras 23 e 24

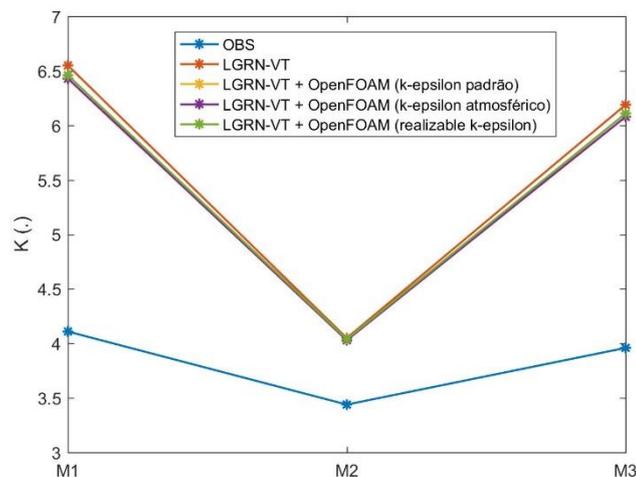
representam os resultados das variantes de análise, provenientes da utilização de três modelos de turbulência e três métodos de estimação dos parâmetros de Weibull (M1, M2 e M3). Nelas, M1 refere-se ao método da máxima verossimilhança, M2 ao método do fator de energia padrão e M3 ao método empírico. A Figura 23 apresenta os resultados para o fator de escala e a Figura 24 os resultados para o fator de forma.

Figura 23- Resultados para o fator de escala em PCR utilizando o método da máxima verossimilhança (M1), o método do fator de energia padrão (M2) e o método empírico (M3)



Fonte: O Autor (2020).

Figura 24- Resultados para o fator de forma em PCR utilizando o método da máxima verossimilhança (M1), o método do fator de energia padrão (M2) e o método empírico (M3)



Fonte: O Autor (2020).

Analisando a Figura 23, percebe-se que, independentemente do método usado: (a) os resultados para o fator de escala das duas abordagens foram bastante semelhantes entre si, com uma diferença menor que 0,5 m/s; (b) o erro associado a cada abordagem, dado pela diferença entre as curvas da parte superior e a curva inferior em azul, mantém-se praticamente constante; (c) ambas abordagens sobrestimaram o fator de escala. Com relação à Figura 24, percebe-se que: (a) os resultados para o fator de forma das duas abordagens foram praticamente os mesmos, independentemente do método usado; (b) o erro associado a cada abordagem é semelhante com os métodos M1 e M3, mas significativamente diferente com o método M2; (c) ambas abordagens sobrestimaram o fator de forma.

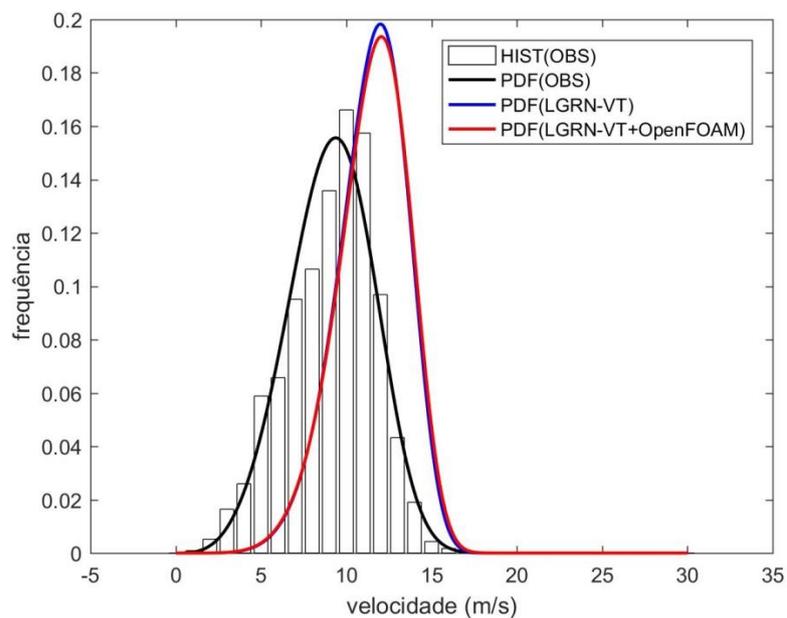
A fim de avaliar o efeito da discrepância no resultado do fator de forma dado pelo método M2, em comparação aos demais, no cálculo da densidade de potência, tem-se o seguinte: considerando o intervalo de variação para K, entre cerca de 4 até 6,5, e aplicando a parte da equação 17 que depende do fator de forma,  $\Gamma(1 + \frac{3}{K})$ , obtém-se para K = 4 o valor de 0,91 e para K = 6,5 o valor de 0,93. Logo, nota-se que a equação usada para o cálculo da densidade de potência média é pouco sensível a variações no valor de K nesse intervalo, resultando em uma diferença pouco significativa no valor final ao escolher o método M2. O mesmo não ocorre para o fator de escala A, que apresenta uma potência de ordem 3 na equação 17, caracterizando uma maior sensibilidade em relação ao fator de escala. Em resumo, a escolha de um dos métodos de inferência dos parâmetros de Weibull em detrimento aos outros não resultou em variações significativas na estimação da densidade de potência média, uma vez que os valores encontrados para o fator de escala A foram bastante semelhantes e a diferença nos valores encontrados para o fator de forma K pouco afetam a estimativa.

De acordo com Rocha et al. (2012), os métodos de inferência dos parâmetros de Weibull de natureza numérica resultaram, de forma geral, em uma melhor descrição da distribuição de velocidade do vento em Paracuru-CE. Dentre os métodos usados neste trabalho, apenas o método da máxima verossimilhança é numérico. Logo, foi escolhido esse método como referência para os resultados mostrados a seguir. Com relação aos modelos de turbulência, é interessante mencionar que, independente do método de determinação de parâmetros utilizado, todos os modelos de turbulência apresentaram resultados semelhantes, mas o

modelo k-epsilon atmosférico obteve ligeiras melhoras em todos três casos. Esse comportamento era esperado, dado que tal modelo tem algumas de suas constantes otimizadas para a solução de problemas de fluxo atmosférico.

De maneira a visualizar o desempenho das modelagens de forma gráfica, adotando o método da máxima verosimilhança e o modelo k-epsilon atmosférico, a Figura 25 mostra o histograma dos dados observacionais na forma de barras, a curva de Weibull da observação em preto, a curva de Weibull de “LGRN-VT” em azul, e a curva de Weibull de “LGRN-VT+OpenFOAM” em vermelho. O melhor modelo é aquele em que sua curva mais se aproxima da curva preta. A posição das curvas azul e vermelha, mais à direita do gráfico, indica a superestimação do fator de escala pelas duas modelagens.

Figura 25- Curvas de Weibull das diferentes modelagens



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 5- Resultados das abordagens “LGRN-VT” e “LGRN-VT + OpenFOAM” em PCR

	<b>A (m/s)</b>	<b>K (.)</b>	<b>P (W/m<sup>2</sup>)</b>
<b>OBS</b>	10,04	4,11	566
<b>LGRN-VT</b>	12,31	6,55	1012
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b> <b>(k-epsilon padrão)</b>	12,42	6,46	1039
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b> <b>(k-epsilon atmosférico)</b>	12,38	6,43	1029
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b> <b>(realizable k-epsilon)</b>	12,53	6,46	1068

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 6- Resultados das abordagens “LGRN-VT” e “LGRN-VT + OpenFOAM” em PCR

	<b>bias (m/s)</b>	<b><math>\rho</math> (.)</b>	<b><math>\hat{\sigma}</math> (.)</b>	<b>RMSE (m/s)</b>
<b>OBS</b>	0	1	1	0
<b>LGRN-VT</b>	2,35	0,78	0,83	2,86
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b> <b>(k-epsilon padrão)</b>	2,45	0,78	0,85	2,94
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b> <b>(k-epsilon atmosférico)</b>	2,41	0,77	0,85	2,91
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b> <b>(realizable k-epsilon)</b>	2,55	0,78	0,86	3,03

Fonte: O Autor (2020).

Os resultados das Tabelas 5 e 6 e as curvas da Figura 25 reiteram a semelhança no desempenho das duas abordagens. Ao observar o local de estudo na Figura 17b, conclui-se que há uma variação considerável de uso do solo e, conseqüentemente, de rugosidade. Há zonas com água, vegetação e, ainda, um centro urbano. A utilização de um único valor de rugosidade em todo o domínio computacional baseado no uso de solo nos arredores da torre anemométrica pode ter levado à pequena piora na caracterização do vento pela abordagem com CFD. Portanto, trabalhos futuros utilizando uma distribuição espacial da rugosidade aerodinâmica do solo podem enriquecer essa análise. Além disso, percebe-se que o modelo analítico apresenta um *bias* elevado, o qual acaba ocorrendo também na modelagem CFD, uma vez que o terreno é relativamente plano e não foram consideradas variações de rugosidade do solo, fazendo com que a condição de vento imposta na fronteira não sofra alterações consideráveis no interior do domínio.

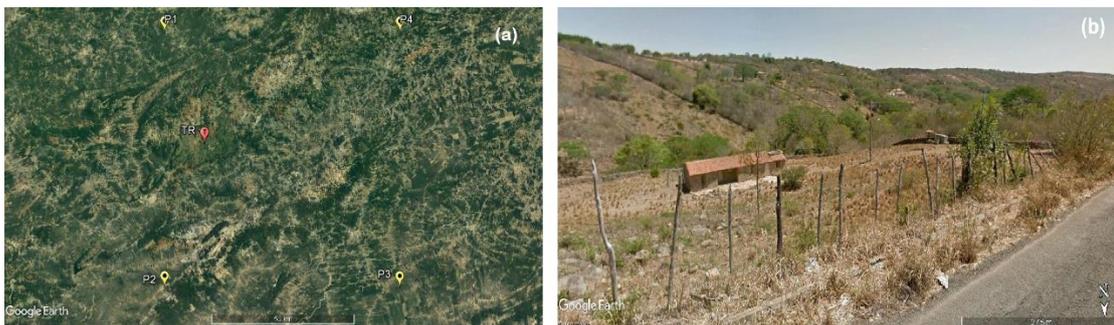
Essa sobrestimação do valor médio pode ser resultado do fato de que três dos quatro pontos de malha do GCM utilizados como entrada ao modelo analítico estão em zona de mar, onde a magnitude do vento é, em geral, maior.

Com respeito à descrição da densidade de potência média, nota-se, a partir da Tabela 5, que ambas abordagens sobrestimaram o recurso eólico ao ter como saída fatores de Weibull mais elevados. O erro percentual referente à abordagem “LGRN-VT” foi de 78,8 % e o da abordagem “LGRN-VT+OpenFOAM” foi de 81,8 %.

## 5.2 RESULTADOS EM TRIUNFO-PE (TRI)

Seguindo a mesma estrutura do caso de PCR, a Figura 26a mostra a localização da torre anemométrica de TRI, e os quatro pontos de malha do GCM mais próximos. A torre de TRI fica no interior do estado de Pernambuco, em uma região um pouco afastada do centro urbano. Devido a isso, não foi possível obter uma vista à nível do solo com o *Google Earth Pro* no local de instalação da torre. A imagem mostrada na Figura 26b é de uma região próxima, com as mesmas características do local de interesse. Nela, nota-se a presença de pequenos arbustos e algumas árvores. Dadas essas características, foi escolhido o valor de 0,08 m para a rugosidade média local, baseando-se no trabalho de Silva et al. (2007).

Figura 26- Localização da torre anemométrica de Triunfo-PE e dos pontos de malha do GCM mais próximos



Fonte: O Autor (2020).

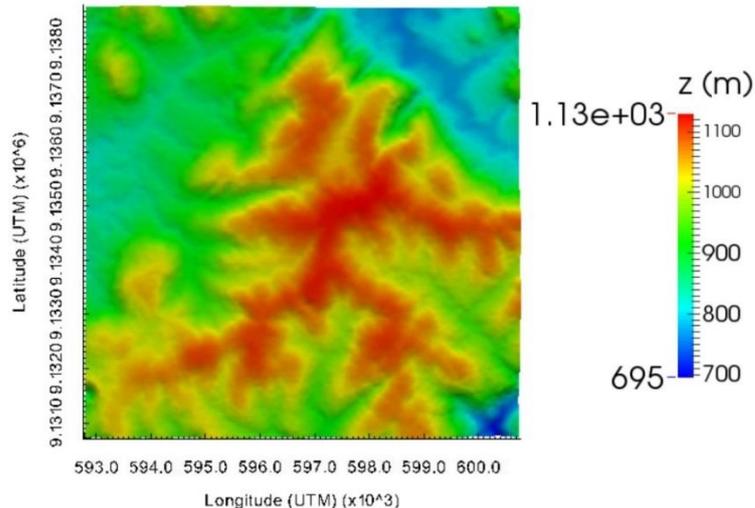
### 5.2.1 Caracterização topográfica e do regime de vento

A partir do mapa de elevação de TRI, mostrado na Figura 27, nota-se uma complexidade topográfica maior, em comparação com PCR. Nele, a variação

máxima de cota vertical é de aproximadamente 430 metros. Assim como em PCR, a torre anemométrica está localizada no centro do mapa. Para TRI, o valor do RIX global calculado foi de 3,48 %, com um valor máximo de 8,15 % na direção de 45°, caracterizando-se como um terreno mais complexo. Com relação à caracterização do regime de vento local, foi gerado o histograma de direção do vento (Figura 28), com os resultados do modelo LGRN-VT e os valores medidos no período de validação. Segundo o modelo analítico, usado como referência para as definições de condição de vento, as direções predominantes foram 0°, 45°, 90°, e 135°. Da mesma forma que no caso de PCR, as quatro direções mencionadas apresentam uma predominância bem marcada, e, portanto, escolheu-se simular apenas esses quatro casos.

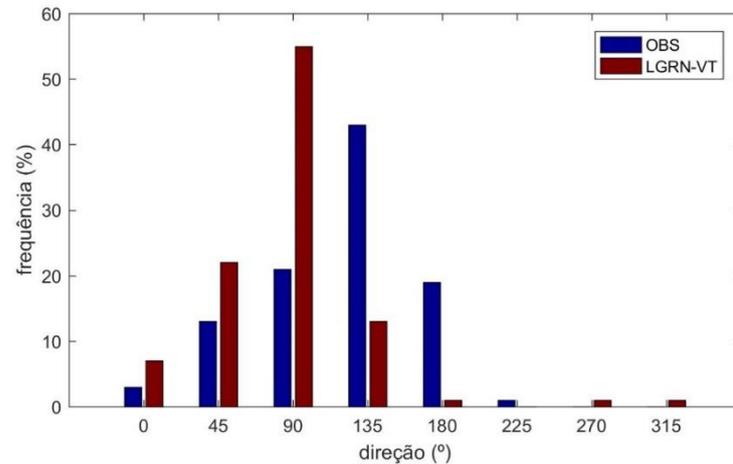
Embora a cobertura temporal dos dados observacionais em Triunfo-PE seja de Julho de 2004 a Abril de 2007, como mostra a Tabela 1, Pereira (2016) identificou falhas em alguns períodos dos dados disponibilizados pelo SONDA para esse local. Logo, para este trabalho, escolheu-se utilizar para a análise o período inicial que vai de Julho de 2004 a Maio de 2005, o qual segundo os testes de qualidade implementados por Pereira (2016) apresenta dados confiáveis.

Figura 27- Mapa de elevação de Triunfo-PE



Fonte: O Autor (2020).

Figura 28- Histograma de direção do vento no período de validação



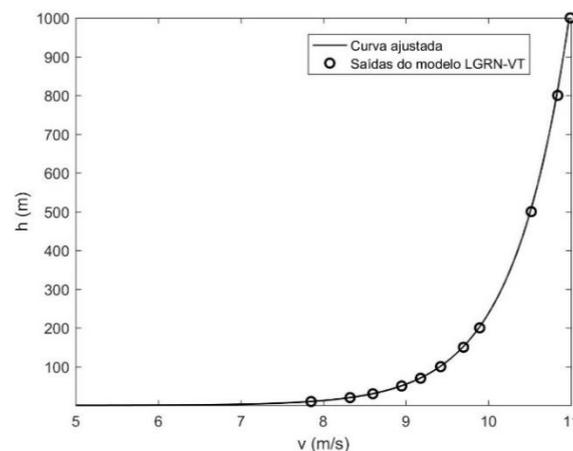
Fonte: O Autor (2020).

### 5.2.2 Definição da condição de contorno da velocidade

Da mesma forma que foram obtidos os perfis verticais de velocidade em PCR, aplicando o modelo LGRN-VT para as alturas de 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 500, 800, e 1000 metros, para cada direção, a Figura 29 mostra os valores médios obtidos em cada altura, e a curva ajustada, representada pela equação 34, para a direção de 90°.

$$v = 6,28 + 0,68 \ln(h) \quad (34)$$

Figura 29- Perfil vertical de velocidade usado como condição de contorno em TRI



Fonte: O Autor (2020).

### 5.2.3 Qualidade de malha

Com o gerador de malha *terrainBlockMesher*, embora tenha sido desenvolvido para aplicações como a deste trabalho, não foi possível criar malhas de boa qualidade em TRI, que apresenta uma complexidade topográfica bastante significativa. Nesse gerador, o usuário define poucos parâmetros, o que simplifica sua utilização, porém, em casos mais complexos, acaba não sendo suficiente para gerar uma boa malha. A fim de contornar esse problema, foi utilizado o gerador de malhas próprio do OpenFOAM, o *snappyHexMesher*, que, por sua vez, possui um grande número de parâmetros a serem configurados. Com esse gerador, foi possível criar uma malha com qualidade maior que as malhas geradas pelo *terrainBlockMesher*, neste caso, e foi considerada satisfatória para esta aplicação. Os parâmetros de qualidade de malha obtidos foram os seguintes: *aspect ratio* máximo de 39,51, *orthogonality* média de 3,88° e máxima de 74,85°, e *skewness* máximo de 5,28. Com esses valores, nota-se que o problema maior está na máxima *orthogonality* e no *skewness*, porém, apenas 16 das 11.447.609 faces apresentaram *orthogonality* maior que 65°, e 27 delas, valores elevados de *skewness*. Vale mencionar que essas células com baixa qualidade encontravam-se nas bordas do domínio, longe do ponto de interesse. Dessa forma, a malha obtida foi considerada satisfatória. O número total de células dessa malha foi de 3.762.383.

### 5.2.4 Simulações

Como dito anteriormente, as direções consideradas nas simulações neste caso foram 0°, 45°, 90°, e 135°. Além dos modelos de turbulência usados em PCR, foi utilizado também o modelo k-omega, a fim de avaliar o desempenho desse modelo em casos de gradientes de pressão mais acentuados. Os *speed-ups* obtidos estão mostrados na Tabela 7.

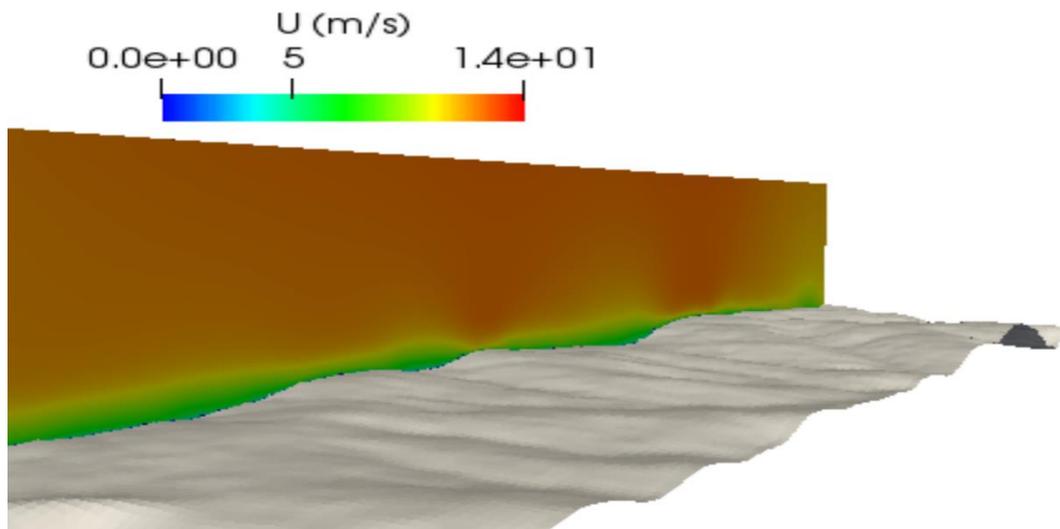
Tabela 7- Speed-ups para diferentes condições de vento (em TRI)

Modelo de turbulência	0°	45°	90°	135°
<b>k-epsilon padrão</b>	+ 25,4 %	- 5,6 %	+ 2,1 %	+ 3,6 %
<b>k-epsilon atmosférico</b>	+ 27,4 %	- 4,1 %	+ 5,0 %	+ 5,5 %
<b>Realizable k-epsilon</b>	+26,0 %	- 3,3 %	+ 2,8 %	+ 5,4 %
<b>k-omega</b>	+ 23,6 %	- 4,1 %	+ 0,0 %	+ 0,9 %

Fonte: O Autor (2020).

Observando os dados da Tabela 7, nota-se que as magnitudes dos *speed-ups* calculados são maiores que às do caso de PCR, como era esperado. Neste caso, em terreno mais complexo, a variação da topografia exerce uma maior influência no vento local, fazendo com que sejam observadas variações percentuais na magnitude do vento da ordem de 25 % no setor  $0^\circ$ , por exemplo. A Figura 30 a seguir mostra um corte da simulação da direção mais frequente,  $90^\circ$ . Nela, é possível notar a aceleração do fluxo nas regiões mais elevadas, onde geralmente são instalados os aerogeradores.

Figura 30- Corte com a magnitude U (em m/s) na direção  $90^\circ$

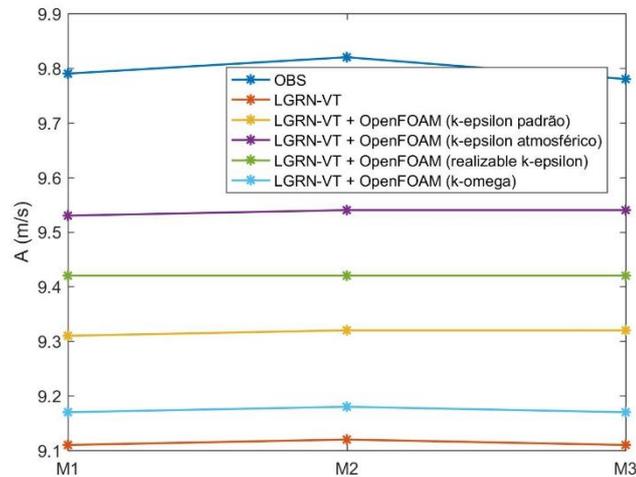


Fonte: O Autor (2020).

### 5.2.5 Estimação dos parâmetros de Weibull

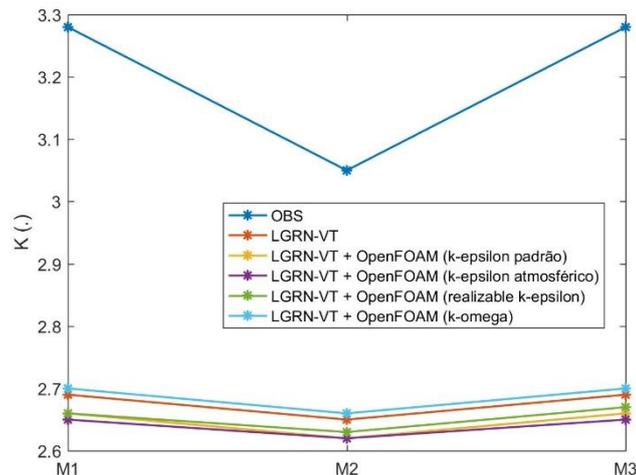
Da mesma maneira que em PCR, as Figuras 31 e 32 mostram os resultados dos parâmetros de Weibull calculados pelo método da máxima verossimilhança (M1), método do fator de energia padrão (M2) e método empírico (M3). A Figura 31 apresenta os resultados para o fator de escala e a Figura 32 os resultados para o fator de forma.

Figura 31- Resultados para o fator de escala em TRI utilizando o método da máxima verossimilhança (M1), o método do fator de energia padrão (M2) e o método empírico (M3)



Fonte: O Autor (2020).

Figura 32- Resultados para o fator de forma em TRI utilizando o método da máxima verossimilhança (M1), o método do fator de energia padrão (M2) e o método empírico (M3)



Fonte: O Autor (2020).

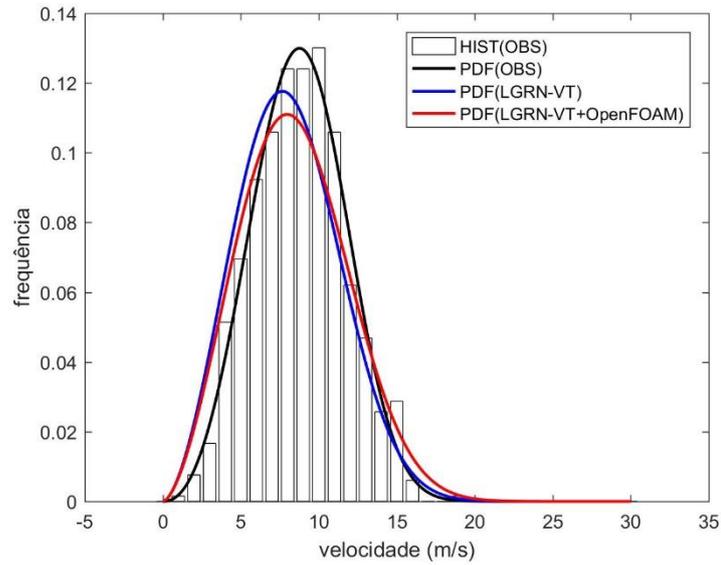
Observando a Figura 31, nota-se que os resultados para o fator de escala das duas abordagens foram um pouco mais distintos entre si, em comparação ao caso de PCR, com uma melhor representação do fator de escala observado dada pela abordagem com OpenFOAM utilizando o modelo de turbulência k-epsilon atmosférico mais uma vez. O erro associado a cada abordagem continuou praticamente constante independentemente do método usado. Ao contrário do primeiro estudo de caso, houve uma subestimação por parte das duas abordagens, embora não tão significativa (diferença em relação ao valor observado menor que 1 m/s).

Com respeito à Figura 32, percebe-se que os fatores de forma das abordagens foram bastante idênticos, independentemente do método de inferência usado. Da mesma maneira que em PCR, o erro associado a cada abordagem foi semelhante nos métodos M1 e M3, havendo uma variação com o método M2, embora de menor magnitude se comparada à variação de mais de duas unidades no caso de PCR. Além disso, ambas abordagens apresentaram uma leve subestimação do fator de forma.

É importante mencionar que a análise feita no estudo de caso anterior a fim de avaliar o efeito da diferença no resultado do fator de forma com o método M2 na estimação da densidade de potência média contínua válida. Porém, como houve uma variação mais significativa no fator de escala por parte das duas abordagens nesse caso, em comparação ao caso anterior, a diferença obtida nas estimativas da densidade de potência foram mais notórias, como mostra a Tabela 8.

Mais um vez, verificou-se que não houveram variações significativas com respeito aos resultados com distintos modelos de turbulência. Porém, o resultado do modelo k-epsilon atmosférico foi o que mais se aproximou dos valores observados para o fator de escala, assim como em PCR, e, portanto, os resultados da abordagem com CFD que serão mostrados a seguir são referentes à utilização desse modelo de turbulência. A Figura 33 apresenta as curvas de Weibull da observação, da abordagem “LGRN-VT”, e da abordagem “LGRN-VT+OpenFOAM”, e as Tabelas 8 e 9 apresentam de forma geral os resultados obtidos pelas duas abordagens, considerando o método da máxima verosimilhança no cálculo dos parâmetros de Weibull.

Figura 33- Curvas de Weibull das diferentes modelagens



Fonte: O Autor (2020).

Tabela 8- Resultados das abordagens “LGRN-VT” e “LGRN-VT + OpenFOAM” em TRI

	<b>A (m/s)</b>	<b>K (.)</b>	<b>P (W/m<sup>2</sup>)</b>
<b>OBS</b>	9,79	3,28	555
<b>LGRN-VT</b>	9,11	2,69	488
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b>			
<b>(k-epsilon padrão)</b>	9,31	2,66	525
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b>			
<b>(k-epsilon atmosférico)</b>	9,53	2,65	564
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b>			
<b>(realizable k-epsilon)</b>	9,42	2,66	542
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b>			
<b>(k-omega)</b>	9,17	2,70	497

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 9- Resultados das abordagens “LGRN-VT” e “LGRN-VT + OpenFOAM” em TRI

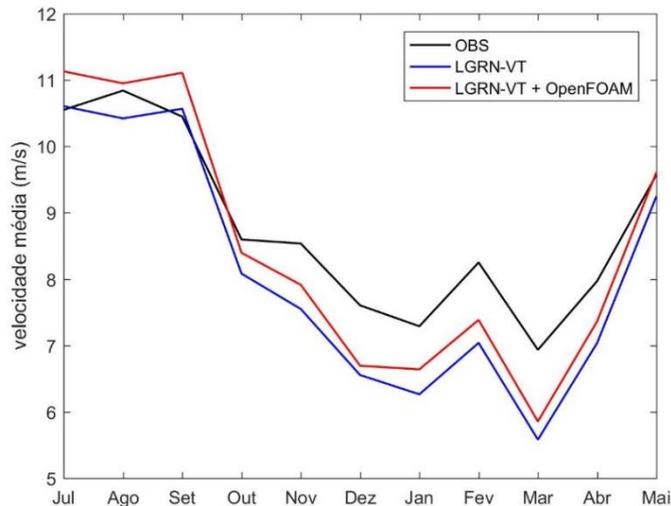
	<i>bias</i> (m/s)			
		$\rho$ (.)	$\hat{\sigma}$ (.)	RMSE (m/s)
<b>OBS</b>	0	1	1	0
<b>LGRN-VT</b>	-0,67	0,58	1,11	2,93
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b> <b>(k-epsilon padrão)</b>	-0,49	0,59	1,14	2,93
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b> <b>(k-epsilon atmosférico)</b>	-0,30	0,59	1,18	2,96
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b> <b>(realizable k-epsilon)</b>	-0,40	0,59	1,15	2,92
<b>LGRN-VT + OpenFOAM</b> <b>(k-omega)</b>	-0,62	0,59	1,11	2,90

Fonte: O Autor (2020).

A partir dos resultados mostrados nas Tabela 8 e 9, é possível perceber que a utilização de CFD ajudou a melhorar essencialmente a representação do valor médio, reduzindo o *bias* de -0,67 m/s para -0,30 m/s, com pouca ou nenhuma influência na correlação e na variância. A Figura 33 permite observar tal mudança no valor médio e também a subestimação obtida pelas duas abordagens. Diferente do caso de PCR, no qual o modelo analítico apresentou um *bias* mais elevado, em TRI, tal modelo conseguiu representar razoavelmente bem o vento nas redondezas da torre anemométrica, tornando-se então uma condição de contorno mais aceitável para as simulações com o OpenFOAM, ao contrário do caso de PCR, resultando, possivelmente, na melhora de desempenho por parte da abordagem com CFD. Além disso, observando a Figura 26, nota-se que a cobertura do solo na região é praticamente homogênea, deixando mais coerente o uso de uma rugosidade única nas simulações, diferente do caso anterior. Com respeito à descrição da densidade de potência média, nota-se, a partir da Tabela 8, que ambas abordagens conseguiram descrever de forma satisfatória a energia contida no vento no período analisado, com destaque para a abordagem com CFD utilizando o modelo k-epsilon atmosférico de turbulência, a qual apresentou um erro percentual de apenas 1,6 %, enquanto o erro da abordagem analítica foi de 12,1 %. A Figura 34 mostra as médias mensais da velocidade do vento medidas pela torre anemométrica e as médias obtidas pelas duas abordagens nos 11 meses estudados. A partir dela, é

possível notar a variação no valor médio da série temporal de velocidade do vento com respeito ao emprego da modelagem CFD.

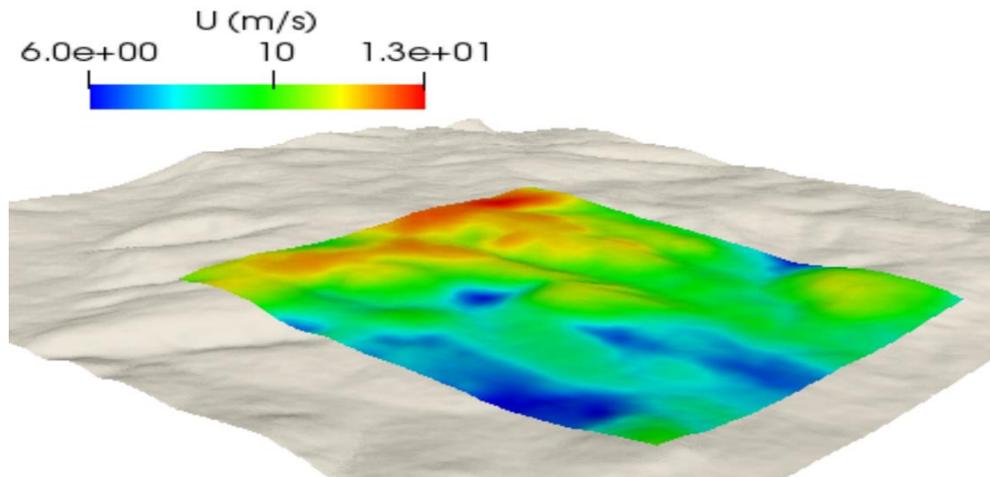
Figura 34- Médias mensais de velocidade do vento em TRI



Fonte: O Autor (2020).

Além de conseguir uma melhor caracterização da densidade de potência média frente à abordagem analítica, reduzindo o erro percentual de 12,1 % para 1,6 %, a proposta deste trabalho, utilizando as saídas de modelos analíticos como condição de contorno de simulações CFD, permite algo que a modelagem analítica por si só, sem considerar a topografia local, não é capaz: a geração de mapas com o campo de velocidade do vento (RADÜNZ et al., 2020), muito úteis na avaliação de recurso eólico de um local para estudos de posicionamento dos aerogeradores. A Figura 35, referente à simulação da direção 90° em Triunfo, mostra um exemplo desses mapas. Ela apresenta uma vista em perfil, na qual é possível ver o terreno, na cor creme, e o campo de velocidades a 100 metros acima do solo em uma região menor. Vale mencionar que para verificar a acurácia de tais mapas de forma mais adequada, seriam necessários pontos de medição espacialmente distribuídos na região de estudo para uma validação mais completa. No caso deste trabalho, só é possível validar o resultado em um único ponto do mapa, no centro, onde está localizada a torre anemométrica.

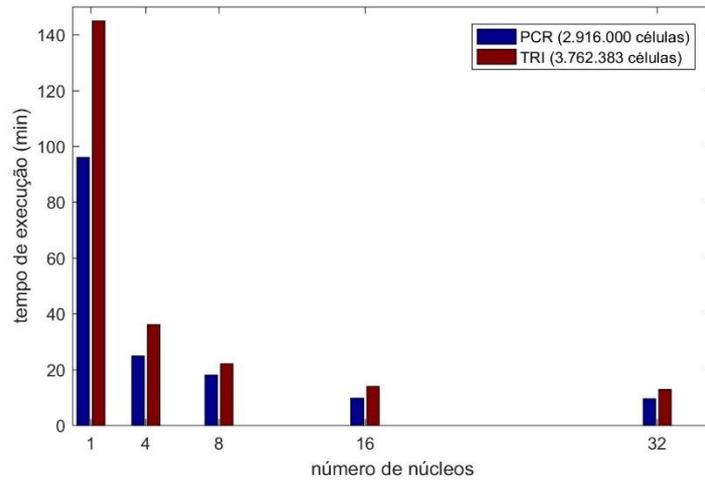
Figura 35- Vista em perfil do mapa de velocidade a 100 m acima do solo em Triunfo-PE (simulação de vento a 90°)



Fonte: O Autor (2020).

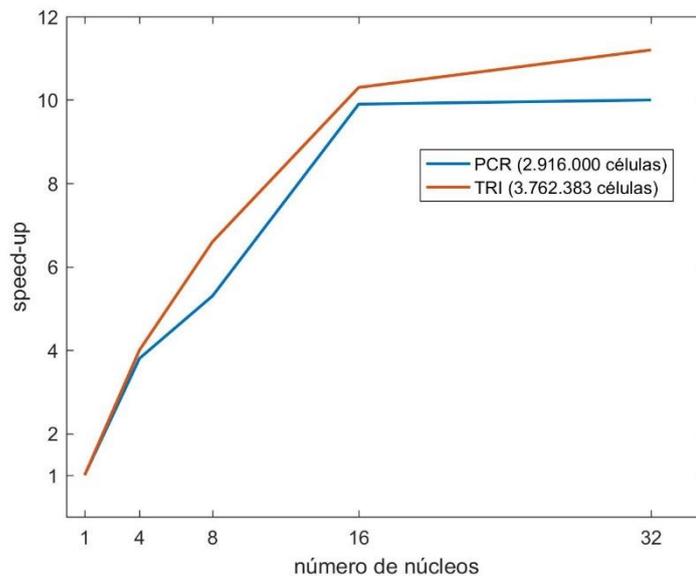
A fim de avaliar a escalabilidade e o custo computacional envolvidos nas simulações realizadas durante este trabalho, foram feitas algumas rodadas paralelizando com diferentes números de núcleos de processamento para verificar a redução no tempo de execução. Os resultados obtidos nessa análise estão mostrados nas Figuras 36 e 37. O conceito de *speed-up* usado na Figura 37 é diferente daquele utilizado anteriormente. Aqui, o *speed-up* representa a razão entre o tempo de execução de uma simulação utilizando um único núcleo e o tempo de execução utilizando um número “n” de núcleos. O *cluster* utilizado para realizar as simulações pertence ao CER-UFPE e conta com 10 nós, cada um com 32 Gb de memória RAM e 32 núcleos. Para essa análise, foi utilizado apenas um dos nós, variando o número de núcleos em 1, 4, 8, 16 e 32.

Figura 36- Tempo de execução das simulações em PCR e TRI



Fonte: O Autor (2020).

Figura 37- Escalabilidade das simulações em PCR e TRI



Fonte: O Autor (2020).

Observando os resultados da Figura 36, nota-se que o tempo de execução das simulações é pequeno. Mesmo com um único núcleo, a simulação não ultrapassa três horas, e dura menos de 20 minutos a partir de 16 núcleos. Logo, pode-se considerar que o custo computacional envolvido é relativamente baixo. Ainda que o custo computacional de uma simulação seja baixo, tal análise continua sendo relevante, pois são necessárias várias simulações para caracterizar de forma satisfatória o regime de vento local, o que acaba elevando o custo computacional

global. A Figura 37 mostra a escalabilidade do problema, que é uma forma diferente de mostrar os resultados da Figura 36. De forma ideal, esperava-se que ao paralelizar o problema em “n” partes, a velocidade na execução seria multiplicada por “n”. Porém, como mostra a Figura 37, não adianta aumentar o número de núcleos indefinidamente a fim de alcançar uma maior velocidade na execução, pois tal velocidade vai decrescendo. Dado esse contexto, decidiu-se utilizar 16 núcleos nas simulações feitas neste trabalho.

## 6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, foi dada continuação à modelagem de camada limite planetária abordada por Silva (2017), aplicando as saídas de um de seus modelos como condição de contorno para simulações CFD com OpenFOAM a fim de caracterizar o comportamento do vento local, em superfície, através da estimação dos parâmetros de escala e de forma de Weibull e da densidade de potência eólica média. Para tanto, adotaram-se dois estudos de caso, um em zona de orografia simples (no município de Paracuru-CE) e outro em zona de orografia complexa (no município de Triunfo-PE). Em ambos os estudos de caso, aplicaram-se duas abordagens: i) modelagem analítica da PBL; ii) modelagem com CFD utilizando as saídas da modelagem da PBL para definição das condições de contorno. Cabe destacar que, ao longo do trabalho, optou-se por utilizar, o máximo possível, bases de dados totalmente livres e ferramentas gratuitas, como o OpenFOAM, que, além de permitir o acesso ao código fonte das aplicações, dispensou o elevado custo com licenças comerciais.

Os resultados obtidos para Paracuru-CE (PCR) mostraram que as duas abordagens acima citadas superestimaram tanto o fator de escala como o fator de forma de Weibull correspondentes aos dados observacionais, levando consequentemente a uma superestimação da densidade de potência média. A utilização de um único valor de rugosidade nas simulações e o fato de que PCR apresenta um terreno relativamente plano podem ter contribuído para que o erro inerente às condições de contorno (dadas pelo modelo LGRN-VT) fosse reproduzido também na posição da torre anemométrica, resultando em uma contribuição inexpressiva do código CFD neste caso. Os modelos de turbulência apresentaram resultados semelhantes entre si, com uma leve melhora por parte do modelo k-epsilon atmosférico. Por fim, vale destacar que os resultados das duas abordagens se mostraram insensíveis ao método empregado para a determinação dos parâmetros de Weibull, uma vez que as variações obtidas nos valores dos parâmetros de Weibull não resultaram em mudanças significativas nas estimativas da densidade de potência média.

Em Triunfo-PE (TRI), por outro lado, o modelo LGRN-VT reproduziu de forma mais acurada que em PCR o comportamento do vento nas vinzinhanças da torre anemométrica, com fatores de escala e de forma de Weibull mais próximos aos

valores observados. O emprego do código CFD permitiu obter resultados ainda mais acurados que o modelo LGRN-VT, como era esperado em local de orografia complexa, principalmente com respeito ao fator de escala, levando a um erro percentual de 1,6% com respeito à descrição da densidade de potência média, enquanto a abordagem analítica apresentou um erro de 12,1 %. O modelo k-epsilon atmosférico mais uma vez obteve o melhor desempenho, ainda que não muito expressivo. Tal como em PCR, os resultados das duas abordagens em TRI se mostraram insensíveis ao método empregado para a determinação dos parâmetros de Weibull. Vale mencionar que não foi utilizado nenhum tipo de pós-processamento, como correção de *bias* e desvio-padrão, nos resultados obtidos, uma vez que o objetivo do trabalho envolvia a comparação entre o desempenho de duas modelagens. Dessa forma, a acurácia dos resultados de cada modelagem poderia ainda ser beneficiada com o uso de técnicas desse tipo.

Em resumo, a utilização de modelos de camada limite planetária como condição de contorno em simulações CFD mostrou ser uma prática promissora na caracterização do vento local, uma vez que o modelo analítico represente de forma acurada as condições de vento nas vizinhanças do local de interesse. Além disso, essa abordagem apresenta um custo computacional relativamente baixo se comparada ao uso de metodologias que empregam modelagem mesoescalar com CFD, por exemplo. Contudo, é necessário realizar mais análises em locais diferentes e utilizar mais pontos de validação com vistas a uma melhor compreensão sobre o desempenho da metodologia proposta neste trabalho. Como perspectivas para trabalhos futuros, destacam-se algumas atividades que podem auxiliar a melhorar ainda mais os resultados obtidos com essa metodologia:

- Descrição detalhada da distribuição espacial da rugosidade aerodinâmica do solo nas simulações CFD;
- Aprofundamento quanto ao estudo de malha em locais montanhosos;
- Utilização, no OpenFOAM, de modelos que consideram os efeitos térmicos;
- Utilização de saídas de modelos com maior resolução espacial, como o WRF, para alimentar o modelo analítico.

## REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. 2020. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>. Acesso em: 30 de jun. de 2020.

AZEVEDO, J. M. D. S. **Development of procedures for the simulation of atmospheric flows over complex terrain, using OpenFOAM**. 2013. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.

BADGER, J. *et al.* Wind-climate estimation based on mesoscale and microscale modeling: statistical–dynamical downscaling for wind energy applications. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, n. 8, p. 1901-1919, 2014.

BALOGH, M.; PARENTE, A.; BENOCCI, C. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an Enhanced k- $\epsilon$  model and wall function formulation: Implementation and comparison for FLUENT and OpenFOAM. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 104, p. 360-368, 2012.

BERNARD, J. C. An evaluation of three models designed for siting wind turbines in areas of complex terrain. **Solar Energy**, v. 46, n. 5, p. 283-294, 1991.

BITSUAMLAK, G. T.; STATHOPOULOS, T.; BÉDARD, C. Numerical evaluation of wind flow over complex terrain. **Journal of Aerospace Engineering**, v. 17, n. 4, p. 135-145, 2004.

BLOCKEN, B. 50 years of computational wind engineering: past, present and future. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 129, p. 69-102, 2014.

BLOCKEN, B.; CARMELIET, J.; STATHOPOULOS, T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 95, n. 9-11, p. 941-962, 2007.

BOWEN, A. J.; MORTENSEN, N. G. Exploring the limits of WAsP the wind atlas analysis and application program. *In*: 1996 EUROPEAN WIND ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION. HS Stephens & Associates, 1996.

CARVALHO, D. *et al.* Wind resource modelling in complex terrain using different mesoscale–microscale coupling techniques. **Applied Energy**, v. 108, p. 493-504, 2013.

CHANG, Y. *et al.* Distribution of aerodynamic roughness based on land cover and DEM—a case study in shanghai, China. *In*: ICUC9—9th international conference on urban climate jointly with 12th symposium on the urban environment, 2015.

CHEN, G. *et al.* OpenFOAM for computational fluid dynamics. **Not. AMS**, v. 61, n. 4, p. 354-363, 2014.

CHOW, F. K.; STREET, R. L. Evaluation of turbulence closure models for large-eddy simulation over complex terrain: flow over Askervein Hill. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, n. 5, p. 1050-1065, 2009.

CINDORI, M. *et al.* Steady RANS model of the homogeneous atmospheric boundary layer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 173, p. 289-301, 2018.

COSTA, A. **Matemathical/statistical and physical/meteorological models for short-term prediction of wind farms output**. 2005. Tese de Doutorado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2005.

DEE, D. P. *et al.* The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the royal meteorological society**, v. 137, n. 656, p. 553-597, 2011.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2008. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-135/topico-110/Relat%C3%B3rio%20Final%202008.pdf>. Acesso em: 30 de jun. de 2020.

ESCRITÓRIO DE METEOROLOGIA DO GOVERNO DE NEW SOUTH WALES. The Greenhouse Effect and Climate Change, 2003. Disponível em <http://www.bom.gov.au/info/GreenhouseEffectAndClimateChange.pdf>. Acesso em: 05 de out. de 2020.

FARIA, R. J. A. **Simulação de Escoamentos Atmosféricos para Estudo de Parques Eólicos**: Estudo comparativo dos softwares OpenFOAM e Windie. 2014. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.

FRANKE, J. *et al.* Recommendations on the use of CFD in wind engineering. COST Action C14. **European Science Foundation COST Office**, 2014.

GARCÍA-SÁNCHEZ, C.; GORLÉ, C. Uncertainty quantification for microscale CFD simulations based on input from mesoscale codes. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 176, p. 87-97, 2018.

GOPALAN, H. *et al.* A coupled mesoscale–microscale framework for wind resource estimation and farm aerodynamics. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 132, p. 13-26, 2014.

HANG, J. *et al.* Natural ventilation assessment in typical open and semi-open urban environments under various wind directions. **Building and environment**, v. 70, p. 318-333, 2013.

HARGREAVES, D. M.; WRIGHT, N. G. On the use of the  $k-\epsilon$  model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 95, n. 5, p. 355-369, 2007.

JACKSON, P. S.; HUNT, J. C. R. Turbulent wind flow over a low hill. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 101, n. 430, p. 929-955, 1975.

KIM, H. G.; PATEL, V. C.; LEE, C. M. Numerical simulation of wind flow over hilly terrain. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 87, n. 1, p. 45-60, 2000.

LANDBERG, L. *et al.* Wind resource estimation - An overview. **Wind Energy**, v. 6, n. 3, p. 261–271, 2003.

LANDBERG, L. Short-term prediction of local wind conditions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 89, n. 3-4, p. 235-245, 2001.

LANDBERG, L.; WATSON, S. J. Short-term prediction of local wind conditions. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 70, n. 1-2, p. 171-195, 1994.

LIMA, L. D. A.; FILHO, C. R. B. Wind energy assessment and wind farm simulation in Triunfo–Pernambuco, Brazil. **Renewable Energy**, v. 35, n. 12, p. 2705-2713, 2010.

LIMA, L. D. A.; FILHO, C. R. B. Wind resource evaluation in são joão do cariri (sjc)–paraíba, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 474-480, 2012.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind energy explained: theory, design and application**. 2. ed. John Wiley & Sons, 2009.

MARTINEZ, B. **Wind resource in complex terrain with OpenFOAM**. 2011. Dissertação de Mestrado. National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark, Roskilde, 2011.

MILLER, C. A.; DAVENPORT, A. G. Guidelines for the calculation of wind speed-ups in complex terrain. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 74, p. 189-197, 1998.

MORTENSEN, N. G. *et al.* Wind atlas analysis and application program (WAsP). In: Wind Energy Department: Scientific and technical progress 1999-2000, 2001.

MURAKAMI, S. Overview of turbulence models applied in CWE–1997. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 74, p. 1-24, 1998.

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, p. 527-530, 1975.

PANOFSKY, H. A. **Atmospheric turbulence**. Sandia Corp., Albuquerque, N. Mex., 1959.

PERALTA, C. *et al.* Validation of the simplefoam (rans) solver for the atmospheric boundary layer in complex terrain. In: **ITM Web of Conferences**. EDP Sciences, p. 01002, 2014.

PEREIRA, M. V. R. **Impacto da altura de aerogeradores sobre a velocidade do vento, energia, efeito de esteira e intensidade de turbulência**: estudos de caso em três projetos eólicos localizados no Brasil. 2016. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

POLITIS, E. S. *et al.* Modeling wake effects in large wind farms in complex terrain: the problem, the methods and the issues. **Wind Energy**, v. 15, n. 1, p. 161-182, 2012.

POPE, S. B. **Turbulent flows**. Cambridge University Press, 2001.

PORTÉ-AGEL, F. *et al.* Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 99, n. 4, p. 154-168, 2011.

RADÜNZ, W. C.; MATTUELLA, J. M. L.; PETRY, A. P. Wind resource mapping and energy estimation in complex terrain: A framework based on field observations and computational fluid dynamics. **Renewable Energy**, v. 152, p. 494-515, 2020.

RAITHBY, G. D.; STUBLEY, G. D.; TAYLOR, P. A. The Askervein Hill project: a finite control volume prediction of three-dimensional flows over the hill. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 39, n. 3, p. 247-267, 1987.

RICHARDS, P. J.; HOXEY, R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- $\epsilon$  turbulence model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 46, p. 145-153, 1993.

ROCHA, P. A. C. *et al.* Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. **Applied Energy**, v. 89, n. 1, p. 395-400, 2012.

SALMON, J. R. *et al.* The Askervein Hill project: mean wind variations at fixed heights above ground. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 43, n. 3, p. 247-271, 1988.

SANTOS, A. T. S. *et al.* Assessment of Wind resources in two parts of Northeast Brazil with the use of numerical models. **Meteorological Applications**, v. 23, n. 4, p. 563-573, 2016.

SANZ RODRIGO, J. *et al.* Numerical CFD modelling of non-neutral atmospheric boundary layers for offshore wind resource assessment based on Monin-Obukhov theory, 2008.

SCHMIDT, J.; PERALTA, C.; STOEVE SANDT, B. Automated generation of structured meshes for wind energy applications. In: Open Source CFD International Conference, London, 2012.

SILVA, J.; RIBEIRO, C.; GUEDES, R. Roughness length classification of Corine Land Cover classes. In: **Proceedings of the European Wind Energy Conference**, Milan, Italy. 2007. p. 110.

SILVA, L. D. D. A. **Downscaling** dinâmico do vento em superfície baseado em parametrizações da camada limite planetária no Nordeste brasileiro. 2017. Dissertação de Mestrado. Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Springer Science & Business Media, 2012.

TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 106, n. D7, p. 7183-7192, 2001.

TAYLOR, P. A.; TEUNISSEN, H.W. The Askervein Hill project: overview and background data. **Boundary-layer meteorology**, v. 39, n. 1-2, p. 15-39, 1987.

TEMEL, O.; BRICTEUX, L.; VAN BEECK, J. Coupled WRF-OpenFOAM study of wind flow over complex terrain. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 174, p. 152-169, 2018.

TROEN, I. E. L. P.; PETERSEN, E.L. European wind atlas. 1989.

UPNERE, S. *et al.* Simulation of the Flow Field over the Coastal Terrain. In: **Numerical Modelling in Engineering**. Springer, Singapore, 2018. p. 400-407, 2018.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson Education, 2007.

WIKIPÉDIA. Types of Mesh. Disponível em [https://en.wikipedia.org/wiki/Types\\_of\\_mesh](https://en.wikipedia.org/wiki/Types_of_mesh). Acesso em: 30 jun. 2020.

WILBY, R. L.; WIGLEY, T. M. L. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. **Progress in physical geography**, v. 21, n. 4, p. 530-548, 1997.

WOOD, N. The onset of separation in neutral, turbulent flow over hills. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 76, n. 1-2, p. 137-164, 1995.

YANG, Y.; GU, M.; CHEN, S.; JIN, X. New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 97, n. 2, p. 88-95, 2009.