

Nuno Gameiro Lopes Duarte

Teste de modelos de simulação do campo de ventos para aplicações de avaliação do potencial eólico

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica
na Especialidade de Produção e Projeto

Setembro/2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Teste de modelos de simulação do campo de ventos para aplicações de avaliação do potencial eólico

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Autor

Nuno Gameiro Lopes Duarte

Orientadores

Professor Doutor António Gameiro Lopes

Dr. Omar Herrera Sanchez (menzio GmbH)

Júri

Presidente Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira
Professor da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira
Professor da Universidade de Coimbra
Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes
Professor da Universidade de Coimbra



Universidade de
Coimbra



Menzio GmbH

Coimbra, setembro de 2018

“It is the set of sails, not the direction of the wind that determines which way we will go”

Jim Rohn

Aos meus pais.

Agradecimentos

Ao terminar mais uma etapa da minha vida, marcada pela entrega e apresentação desta dissertação, é necessário prestar reconhecimento e agradecimento às pessoas, que de alguma maneira, contribuíram para este marco.

Começo por agradecer aos meus pais, os principais impulsionadores da minha vida académica e crescimento pessoal, que de forma incansável me apoiaram e providenciaram tudo aquilo de que sempre precisei sem nunca falharem.

Aos meus familiares e amigos, pela atmosfera de apoio e afeto que contribuiu para o êxito do meu grau de Mestre.

Agradecimento especial ao Professor Doutor António Gameiro Lopes, pela grande paciência e orientação na realização desta dissertação.

Aos meus companheiros da Fan-Farra Académica de Coimbra, que ao longo destes 5 anos me proporcionaram momentos de grande diversão e companheirismo.

Por fim agradecer à minha namorada, que nos bons e maus momentos nunca me desilude e está sempre presente para me ajudar.

Resumo

Hoje em dia, os Softwares permitem estudar e fazer previsões fiáveis das características dum escoamento ao longo de uma superfície com determinada topografia e rugosidade. Estes estudos impulsionam o planeamento de projetos ambientais como por exemplo a construção de parques eólicos.

Esta dissertação tem como base a utilização do software WindSation para simulação de resultados em dois casos distintos, o caso de Bolund e o caso Parque Eólico, sendo o primeiro um caso teste do software e o segundo uma simulação de resultados para um parque eólico com posterior comparação de dados reais.

Após a obtenção dos resultados e sua análise, foi realizada a validação de ambos os casos, concluindo-se sobre a fiabilidade e o potencial do programa WindStation.

Palavras-chave: Simulação, Modelo de Turbulência, Vento, Topografia, Condições Fronteira, Malha.

Abstract

Nowadays, Software's allow us to study and make precise predictions of the characteristics of a flow around a surface with a specific topography and roughness. These predictions are fundamental in the planning of environmental projects such as the constructions of wind farms.

This thesis is based in simulation of two different cases with the software WindStation, the Bolund case and the wind farm case. The Bolund case serves as test for the software meanwhile the wind farm case consists on obtaining results and compare them with recorded data.

After analysing all the obtained data, a conclusion was made about the reliability and potential of the software WindStation.

Keywords Simulation, Turbulence Model, Wind, Topography, Boundary conditions, Mesh.

Índice

Índice de Figuras.....	ix
Simbologia e Siglas.....	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Revisão Bibliográfica.....	3
1.2. Definições e Conceitos Importantes	4
1.2.1. Vento.....	4
1.2.2. Escoamento	5
1.2.3. Força de Coriolis	6
1.2.4. Conceitos relacionados com a utilização do Windstation.....	7
1.2.5. Conceitos base do funcionamento do Windstation.....	11
2. Caso de Bolund	15
2.1. Apresentação do caso.....	15
2.2. Estudo da variação da malha	17
2.2.1. Malha Horizontal.....	18
2.2.2. Malha vertical.....	22
2.3. Influência do modelo de turbulência	26
2.4. Estudo da variação do esquema de advecção	29
2.5. Observações.....	32
3. Caso do parque eólico	35
3.1. Estudo de Malha	36
3.2. Análise dos resultados obtidos e estudo da influência da posição de introdução das condições fronteira.....	37
4. Conclusões da dissertação	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
APÊNDICE A.....	51
APÊNDICE B.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da força de Coriolis	7
Figura 2 - Exemplo de malha horizontal fina (Malha de 1m no caso de Bolund).....	7
Figura 3 - Exemplo de malha horizontal grosseira (Malha de 5m no caso de Bolund).....	8
Figura 4 - Representação dos níveis verticais (malha fina vertical no caso de Bolund)	8
Figura 5 - Domínio utilizado no caso parque eólico.....	9
Figura 6 - Exemplo da definição das variáveis para uma estação meteorológica no WindStation	9
Figura 7 - Exemplo de convergência da simulação para o limite de convergência de $1e - 5$	10
Figura 8 – Ilha de Bolund.....	15
Figura 9 - Linhas de vento e posição dos mastros de medição no caso da ilha de Bolund..	16
Figura 10 - Domínio utilizado no Software WindStation no caso de Bolund.....	17
Figura 11 - Condições Fronteira	17
Figura 12 - Resultados para os valores de malha de 5m,2m e 1m: a) Distribuição da divisão entre a velocidade obtida na simulação pelo valor de referência medido experimentalmente em M9 ao longo da linha B; b) Perfil horizontal da linha B ..	18
Figura 13 - Resultados para os valores de malha de 5m,2m e 1m: a) Distribuição da divisão entre a velocidade obtida na simulação pelo valor de referência medido experimentalmente em M0 ao longo da linha B; b)Perfil horizontal da linha B ...	19
Figura 14 – Resultados adquiridos do estudo de Sørensen (2010): a) Distribuição da divisão entre a velocidade obtida na simulação pelo valor de referência medido experimentalmente em M0 ao longo da linha A; b)Perfil horizontal da linha A com linhas representativas das medições a 3 e a 5 metros do solo	20
Figura 15, 16 – Resultados adquiridos do estudo de Sørensen (2010): a) Distribuição da divisão entre a velocidade obtida na simulação pelo valor de referência medido experimentalmente em M9 ao longo da linha B; b)Perfil horizontal da linha B com linhas representativas das medições a 3 e a 5 metros do solo	20
Figura 17 - Sobreposição de Resultados Linha A: a) Velocidade por Velocidade de Referência; b) Perfis horizontais	21
Figura 18 - Sobreposição de Resultados Linha B: a) Velocidade por Velocidade de Referência; b) Perfis horizontais	21
Figura 19 – ΔS com altura para diferentes malhas verticais nos pontos: a) M1; b) M2; c) M3; d) M4; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Andreas Bechmann et al. (2011).....	24

Figura 20 - Resultados ao longo da linha A 239 ^o para diferentes modelos de turbulência: a) ΔS ; b) Δk ; c) deflexão tomando a direção em M0 como referência; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011). ...	27
Figura 21 - Resultados Verticais no ponto M3, para diferentes modelos de turbulência: a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Andreas Bechmann et al. (2011).....	28
Figura 22 - Resultados ao longo da linha A 239 ^o para diferentes esquemas de advecção utilizando o modelo de turbulência Realizable k - ϵ : a) ΔS ; b) Δk ; c) deflexão tomando a direção em M0 como referência; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).....	30
Figura 23 - Resultados Verticais no ponto M2, para diferentes esquemas de advecção, para o modelo de turbulência Standard k - ϵ : a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).	31
Figura 24 - Distribuição dos componentes intervenientes do caso parque eólico Fonte: Vicente (2018).....	35
Figura 25 – Estudo de malha do caso parque eólico para o parâmetro: a) Velocidade do vento na turbina T0; b) Direção do vento na turbina T0; c) Velocidade do vento na turbina T8; d) Direção do vento na turbina T8	36
Figura 26 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente, para o parâmetro Velocidade do Vento na turbina T8, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro WMM a 101 metros de altura.....	38
Figura 27 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente, para o parâmetro Direção do Vento na turbina T8, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro WMM a 101 metros de altura.....	39
Figura 28 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente, para o parâmetro Velocidade do Vento na turbina T8, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição da turbina T20.....	40
Figura 29 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente, para o parâmetro Direção do Vento na turbina T8, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição da turbina T20.....	41
Figura 30 – Erro médio local e total dos resultados simulados computacionalmente para os parâmetros velocidade e direção de vento, na introdução das condições fronteira iniciais na posição do mastro WMM e da turbina T20, em relação aos resultados medidos experimentalmente, para o parâmetro velocidade do vento.	42
Figura 31 – Erro médio local e total dos resultados simulados computacionalmente para os parâmetros velocidade e direção de vento, na introdução das condições fronteira iniciais na posição do mastro WMM e da turbina T20, em relação aos resultados medidos experimentalmente, para o parâmetro direção do vento.....	42

Figura 32 – Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional para os parâmetros velocidade e direção do vento, variando a posição de introdução das condições fronteira iniciais entre o mastro de medição WMM e a turbina T20.	43
Figura 33 - Erro médio total das simulações computacionais nos parâmetros velocidade e direção de vento, em relação aos dados medidos experimentalmente.	45
Figura 34 - Resultados Verticais no ponto M1, para diferentes modelos de turbulência: a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).....	51
Figura 35 - Resultados Verticais no ponto M2, para diferentes modelos de turbulência: a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).....	52
Figura 36 - Resultados Verticais no ponto M4, para diferentes modelos de turbulência: a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).....	53
Figura 37 - Resultados ao longo da linha A 239 ^o para diferentes esquemas de advecção utilizando o modelo de turbulência Standard k - ϵ : a) ΔS ; b) Δk ; c) deflexão tomando a direção em M0 como referência; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).....	54
Figura 38- Resultados ao longo da linha A 239 ^o para diferentes esquemas de advecção utilizando o modelo de turbulência RNG k - ϵ : a) ΔS ; b) Δk ; c) deflexão tomando a direção em M0 como referência; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).....	55
Figura 39 - Resultados Verticais no ponto M2, para diferentes esquemas de advecção, para o modelo de turbulência RNG k - ϵ : a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).	56
Figura 40 - Resultados Verticais no ponto M2, para diferentes esquemas de advecção, para o modelo de turbulência Realizable k - ϵ : a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).	57
Figura 41 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T0, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.	60
Figura 42 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T6, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.	61
Figura 43 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T9, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.	62
Figura 44 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T20, entre os dias 1/8 e 3/8 de	

2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.	63
Figura 45 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T21, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.	64
Figura 46 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T22, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.	65
Figura 47 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T23, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.	66
Figura 48 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro WMM a 40m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.	67
Figura 49 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro WMM a 60m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.	68
Figura 50 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro WMM a 80m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.	69
Figura 51 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro WMM a 99m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.	70
Figura 52 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T0, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20. ...	71
Figura 53 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T6, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20. ...	72
Figura 54 Figura 55 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T9, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.....	73
Figura 56 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T21, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20. ...	74

Figura 57 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T22, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20. ...	75
Figura 58 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T23, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20. ...	76
Figura 59 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro de medição WMM a 40m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.	77
Figura 60 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro de medição WMM a 60m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.	78
Figura 61 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro de medição WMM a 80m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.	79
Figura 62 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro de medição WMM a 99m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.	80
Figura 63 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro de medição WMM a 101m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.	81

SIMBOLOGIA E SIGLAS

z_0 – Comprimento de rugosidade [m]

z – Altura [m]

ρ – Massa volúmica [kg/m^3]

t – tempo [s]

x_i – Coordenada cartésiana genérica [m]

p – pressão [Pa]

Γ – Viscosidade efetiva [$\frac{N}{m^2}$]

Ω – Velocidade de rotação da Terra

λ – Latitude local [°]

S_{ui} – Coeficiente de porosidade

θ – Temperatura potencial [K]

β – Coeficiente de expansão térmica [K^{-1}]

T – Temperatura [K] ou [°C]

C_p – Calor específico (J.Kg/K)

ε – Taxa de dissipação da energia cinética de turbulência [$\frac{m^2}{s^3}$]

V ou Wspd – Velocidade do vento [$\frac{m}{s}$]

Wspdref – Velocidade de referência do vento em M0 ou M9 [$\frac{m}{s}$]

μ_t – Viscosidade turbulenta [N.s/m²]

k ou TKE – Energia cinética de turbulência [$\frac{m^2}{s^2}$]

T_l – Intensidade de turbulência do escoamento

LES – Large Eddy Simulation

RANS – Reynolds – Averaged Navier – Stokes

ZGround – Altura [m]

1. INTRODUÇÃO

A mecânica dos fluidos é a área que está na base do estudo do comportamento dos fluidos e escoamentos, dando origem ao interesse de fazer previsões no comportamento destes.

Desde muito cedo que o ser humano mostrou interesse em conhecer e compreender os fenómenos mais básicos em seu redor para poder, de alguma maneira, controlá-los para o seu benefício. Um dos maiores exemplos é a aprendizagem na Grécia antiga a utilizar o vento como meio de propulsão nos barcos que, apesar de não possuírem algum método de previsão de comportamento do fluido, desenharam e criaram modelos de velas que atualmente ainda são usados e servem de base para o desenvolvimento de novos modelos de velas.

Desde esses tempos, o método de estudo deste fenómeno mudou, começando por ser um estudo bastante básico e prático (onde se estudavam os fenómenos por meio experimental, num ambiente onde as condições muitas vezes não eram controladas, e se analisava posteriormente os resultados), evoluindo para a criação de túneis de vento, modelos matemáticos (componente teórica) e de programas de simulação que permitem a realização de estudos precisos onde as condições estão sob controlo.

Apesar de, na atualidade, existirem diversos modelos e métodos de previsão que apresentam resultados bastante fiáveis, a previsão de alguns escoamentos, como por exemplo em torno de geometrias complexas, permanece ainda como grandes desafios e sendo por isso utilizados como teste aos modelos.

Neste seguimento, nasce a realização desta dissertação, onde se vai estudar o software WindStation (Lopes 2018) começando por um caso teste (Caso de Bolund), onde os resultados obtidos no programa irão ser comparados com dados medidos experimentalmente e com resultados de estudos já publicados. Este software será ainda utilizado posteriormente para a simulação de um caso de um parque eólico no norte de França.

A utilização parâmetros como a velocidade de vento, turbulência e energia cinética de turbulência em função da posição (vertical ou horizontal) serão fundamentais na

obtenção dos resultados assim como o regime de turbulência escolhido ou tipo de esquema de advecção.

Como já referido, todos os resultados serão obtidos através da utilização do software WindStation. Este é um software que permite a simulação numérica de escoamentos em topografias complexas através da resolução de equações diferenciais para escoamentos de fluidos, possibilitando a utilização de 4 modelos de turbulência: Standard k- ϵ , RNG k- ϵ , Realizable k- ϵ e Limited Length k- ϵ . O programa permite o cálculo de vários projetos em simultâneo através da ferramenta "Batch run", com grande flexibilidade na escolha de domínios e malhas, e inclui ainda características como *automatic alignment with free stream direction and nesting* (alinhamento automático do domínio e da malha, para a direção do vento a calcular). A visualização e exportação dos resultados pode ser realizada em formato "Text file" e em Microsoft Excel.

Esta dissertação será dividida em 4 partes: Introdução, Caso de Bolund, Caso do parque eólico e Conclusões.

Presente neste capítulo, Capítulo - 1 - Introdução, estará uma breve apresentação do software Windstation, da dissertação e da estrutura em que se irá desenrolar. Será ainda exposta uma revisão bibliográfica (onde serão mencionados os conhecimentos já desenvolvidos e divulgados por outros investigadores sobre temas complementares e elucidativos do tema presente nesta tese) e a apresentação de conceitos e definições importantes para a compreensão do presente estudo e funcionamento do software.

Avançando para o Capítulo 2 – Caso de Bolund, começar-se-á por uma breve apresentação do caso em si, onde se descrevem os locais das medições e dos resultados experimentais e onde se focará o estudo e as simulações que serão feitas. Posteriormente, serão apresentados os resultados obtidos no WindStation e será feita a comparação com os dados experimentais e fornecidos noutros estudos. Será ainda feito um estudo da influência de diversos parâmetros nos resultados obtidos (modelos de turbulência, influência das malhas horizontal e vertical, influência do esquema de advecção, entre outros) e a interpretação e avaliação destes. Por fim, serão apresentados alguns problemas que se encontraram no estudo do caso e as soluções encontradas para os resolver, problemas estes que contribuirão para o melhor conhecimento e desenvolvimento do WindStation.

O Capítulo 3 – Caso Parque Eólico, representa a utilização do programa para a obtenção e comparação de resultados simulados com resultados medidos no terreno, num

parque eólico no norte de França. Começar-se-á por apresentar e explicar o caso em estudo, situando o local de medição e descrevendo a origem e obtenção tanto dos resultados simulados como dos medidos no terreno. A representação dos resultados, será acompanhada de breves interpretações destes.

Por fim, no Capítulo 4 – Conclusões da Dissertação, é feito um resumo conclusivo da dissertação, onde se explora a maneira como decorreu o estudo, que lições e conhecimentos se retiraram na realização deste.

1.1. Revisão Bibliográfica

Esta secção da dissertação, descreve de forma resumida alguns dos artigos pesquisados e outros documentos, que contribuiram para a realização deste trabalho.

Começa-se por referir a Tese de Pedro J. F. S. Jeanmonod (2015) onde é executado um estudo do programa WindStation, através de dois casos, onde se conclui sobre a influência da variação de determinados parâmetros (topográficos e do software), nos resultados obtidos por simulação. Neste foi constatado que a facilidade e rapidez da convergência do cálculo numérico depende diretamente da complexidade da topografia, e que os resultados obtidos variam de forma significativa com a alteração dos parâmetros de simulação e condições fronteira (podendo mesmo produzir uma mudança na maneira como o escoamento incidente interage com a topografia).

Bechmann et al. (2007), realizam o cálculo computacional do escoamento sobre a topografia da ilha de Bolund, com o propósito de preparar uma campanha de medição experimental e as respetivas posições para os mastros de medição e instrumentação. Em suma, são propostos locais para 10 mastros de medição (variando a sua altura em 16, 9 e 5 metros) equipados por anemómetros de copo e anemómetros sónicos.

Bechmann et al. (2009), apresentam de forma geral, a campanha de medição de dados atmosféricos realizada em 2007 para a ilha de Bolund, incluindo a descrição da orografia, instrumentação e análise dos dados obtidos.

Bechmann et al. (2011), executam a comparação de dados experimentais recolhidos na ilha de Bolund com os dados obtidos em modelos de escoamentos em micro-escala. Foram utilizados cerca de 57 modelos diferentes, abrangendo desde modelos físicos como canais de água e tuneis de vento, a modelos numéricos com base em LES, RANS e modelos linearizados. Em suma, os modelos físicos atingiram resultados satisfatórios e foi

possível a introdução de condições fronteira sem perturbações. A nível dos modelos numéricos, os modelos RANS apresentaram os melhores resultados, sendo que foram os modelos onde se obtiveram menos erros na previsão do parâmetro TKE e speed-up.

Takanori Uchida et al.(2014) apresenta um estudo do caso de Bolund onde as condições de vento são simuladas através da utilização do software RIAM-Compact (que se baseia no modelo de turbulência “LES”) e da construção de um túnel de vento. O objetivo da experiência foi validar o software através da comparação dos seus resultados com os dados do túnel de vento e de outros softwares. No final, os resultados declararam-se satisfatórios quanto à utilização do programa e modelo de turbulência escolhidos.

Apesar de menos influentes, mas por conterem informação que complementa o estudo em questão nesta dissertação, vale a pena mencionar os seguintes artigos:

- Bechmann in The Bolund Experiment: A Validation Dataset, apresenta instruções que permitem a modeladores simularem 4 casos de teste da ilha de bolund, relacionados com os seus estudos de comparação.
- Sørensen (2009), apresenta a comparação entre resultados obtidos por simulação em CFD e os resultados obtidos experimentalmente para a ilha de Bolund.
- Berg et al.(2011), apresentam uma análise detalhada das medições e resultados obtidos na campanha de medição na ilha de Bolund, realizada durante o Inverno de 2007/2008.

1.2. Definições e Conceitos Importantes

Neste subcapítulo serão apresentados breves conceitos e definições, que se consideram importantes para a compreensão do presente estudo e funcionamento do Software.

1.2.1. Vento

O vento define-se como o movimento do ar devido à diferença de pressão. A movimentação do ar dá-se geralmente do local de maior pressão para o de menor de pressão, sendo as diferenças de pressão afetadas pela variação de temperatura nas massas de ar (esta variação pode ser causada pela radiação solar ou da crosta terrestre, assim como de outros fenómenos que impliquem a transferência de calor para a massa de ar).

O vento pode ser caracterizado quanto à sua intensidade e direção sendo as duas principais causas para este fenómeno, a nível global, as diferenças de temperatura entre os polos e o equador, e a rotação da Terra (traduzida pela força de Coriolis).

1.2.2. Escoamento

Define-se como a interação de um fluido com o meio que o rodeia ao longo do seu movimento. Um escoamento pode ser classificado quanto a vários parâmetros:

- **Compressibilidade:** Um escoamento diz-se compressível quando a sua densidade varia de forma significativa com a pressão.
- **Regime de escoamento:** “Um escoamento laminar ocorre quando as camadas de fluido adjacentes se deslocam com a mesma velocidade, ou deslizam entre si de forma relativamente ordenada se a sua velocidade for ligeiramente diferente, nunca se cruzando nem intersectando. Se, pelo contrário, camadas contíguas de fluido se movem com velocidades claramente distintas e trajetórias individuais de elementos de fluido se cruzam ou se intersectam de forma aparentemente aleatória, então o escoamento é dito turbulento” (Oliveira e Lopes, 2010, p.167).
- **Variação no tempo e posição:** Escoamento permanente ou estacionário é aquele onde a sua velocidade ou pressão não se alteram ao longo do tempo, podendo alterar-se de um local para o outro, mas nesse preciso local a sua variação em função do tempo é nula. Por outro lado, um escoamento não permanente é aquele em que a sua velocidade e pressão, se alteram com tempo podendo também alterar-se com a sua posição (pode denominar-se também de escoamento variável ou transitório). Por fim, um escoamento em que as suas características não variem em função da posição, diz-se um escoamento uniforme
- **Dimensão:** Os escoamentos poderão ser unidimensionais ou bidimensionais. Caso as suas variáveis (velocidade, massa volúmica, pressão, etc.) variem apenas ao longo de um eixo de coordenadas espaciais, trata-se de um escoamento unidimensional. Se as partículas de um fluido escoam em planos paralelos e seguindo trajetória idênticas,

não havendo escoamento na direção normal aos planos, está-se perante um escoamento bidimensional.

- “Ambiente” do Escoamento: Um escoamento que se encontre em contacto a toda a sua volta com a atmosfera (como é o caso de rios) denomina-se de exterior, enquanto que um escoamento que em nenhuma das suas secções transversais se encontre em contacto com a atmosfera, como é o caso de um escoamento num tubo, denomina-se de interior.

1.2.3. Força de Coriolis

Descoberta em 1835 pelo físico e matemático francês Gaspard Gustave de Coriolis, a força de Coriolis representa uma força fictícia que é usada na simplificação de cálculos envolvendo sistemas rotativos como o movimento da água, ar e de projéteis situados na superfície da Terra em rotação. Representa uma força de inércia que em simultâneo com a força de arrasto e centrífuga, atua num corpo em rotação e é perpendicular ao plano definido pelo eixo de rotação e pelo vetor velocidade.

Dependendo do hemisfério em que se encontra o sistema, a força atua de forma diferente, sendo um dos melhores exemplos a erosão nas margens dos rios. A erosão no hemisfério Norte será maior na margem direita e no hemisfério Sul na margem esquerda. Além disso esta força influencia também as correntes marítimas em geral.

Para além de influenciar os mares e rios, nota-se o efeito da força de Coriolis nos ventos dos anticiclones que não se encontram orientados em linha reta para o centro, mas sim em torno dele, onde no hemisfério norte é num sentido (para a direita) e no hemisfério Sul no sentido oposto (para a esquerda). Este fenómeno está representado na figura 1.

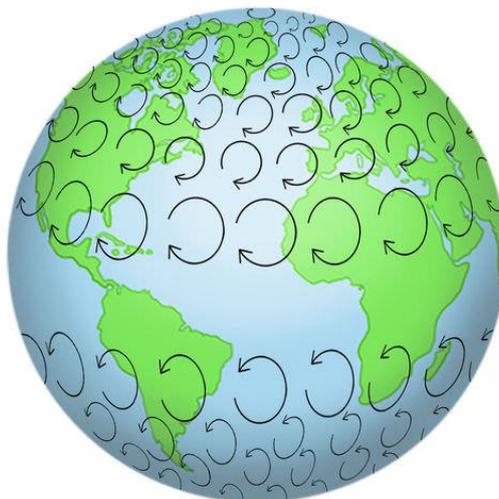


Figura 1 - Representação da força de Coriolis

1.2.4. Conceitos relacionados com a utilização do Windstation

1.2.4.1. Malha

O conceito de malha consiste na divisão do domínio de cálculo e no tamanho de cada parcela dessa divisão. Geralmente, quanto menor o tamanho da malha, mais preciso será o cálculo geral. Por conseguinte, com a diminuição do tamanho da malha, o número de nodos irá aumentar, tornando o cálculo mais pesado e demorado.

Para este estudo, o conceito de malha poderá ser vertical (figura 4) ou horizontal (figuras 2 e 3).

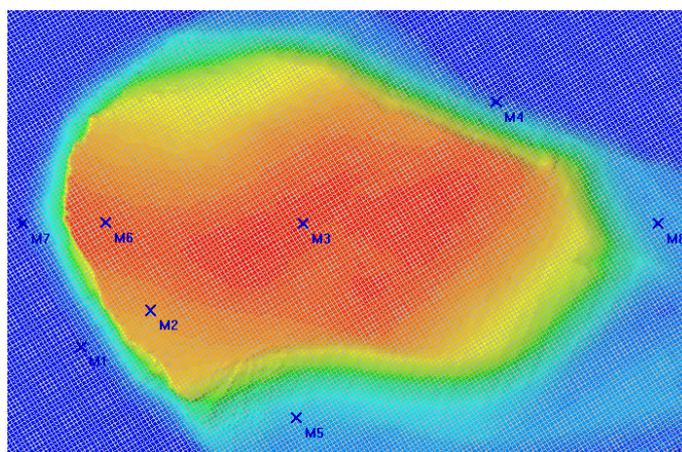


Figura 2 - Exemplo de malha horizontal fina (Malha de 1m no caso de Bolund)

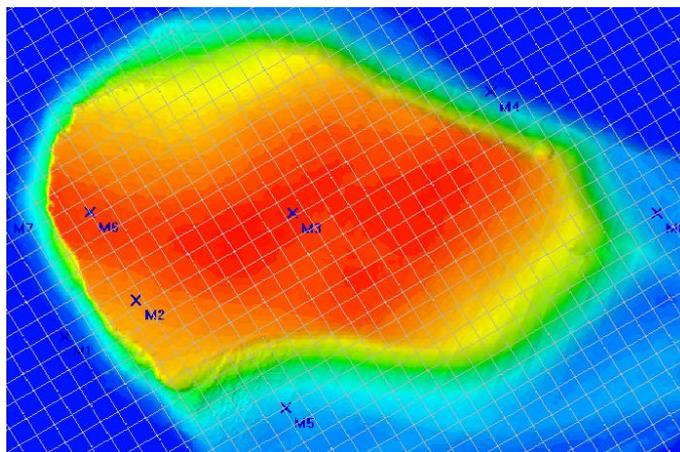


Figura 3 - Exemplo de malha horizontal grosseira (Malha de 5m no caso de Bolund)

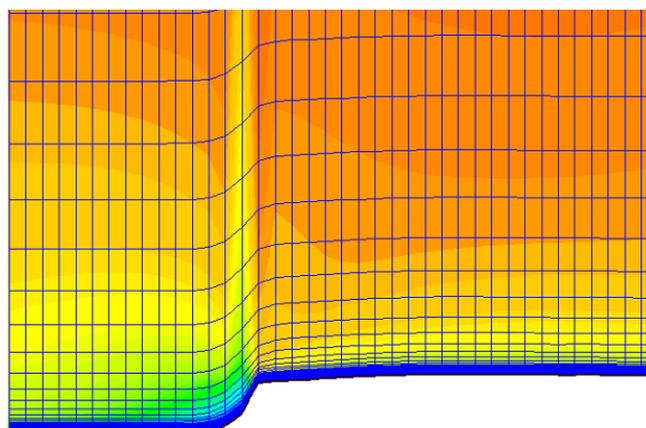


Figura 4 - Representação dos níveis verticais (malha fina vertical no caso de Bolund)

1.2.4.2. Domínio de cálculo

Domínio de cálculo é a zona pré-definida na qual se irá aplicar parâmetros de cálculo e condições fronteira para a obtenção dos resultados, nos locais desejados. Em geral, será a área de cálculo a utilizar pelo programa na topografia a estudar (representado na figura 5).

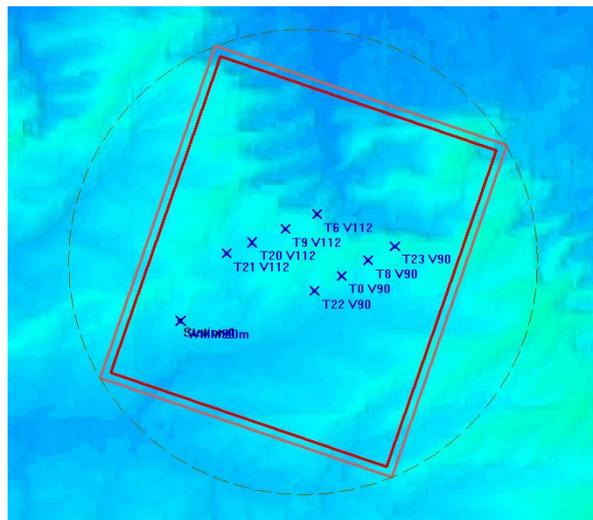


Figura 5 - Domínio utilizado no caso parque eólico

1.2.4.3. Condições fronteira

As condições fronteiras representam os valores e condições a atribuir nas fronteiras do domínio de cálculo, sendo dadas na forma de variáveis como a velocidade do vento, direção do vento, temperatura, intensidade de turbulência, comprimento de rugosidade, etc.

Para o presente trabalho, estas variáveis foram aplicadas como dados de uma estação meteorológica, e o programa tomou estes dados como condições fronteira para o cálculo. Na estação meteorológica, são estabelecidos a velocidade e a direção do vento incidente, valores que são utilizados para calcular o perfil de velocidades incidentes e as grandezas turbulentas (figura 6).

Meteo Stations

Name: [Station 1] Add station GraphV
 GraphT
 Data
 Station 1 Delete station Purge stations
Add new level Purge levels

Tl correction:
 Activate

Height [m]	WindSpd [m/s]	Direction [°]	Temperature [°C]	Turb.Intensity []
101	0.642028	108.9999	Missing	Missing

Roughness for profile: Average on calculation area
Time stamp: [01.08.2016 00.00] Location:
Averaging time length: 0 h 10 min X [m]: [606335.0]
Adopted roughness length z0: 0.0897 m Y [m]: [5474750.0]
MO length: ---
V*: not computed
OK Cancel Update

Note: hold the Shift key to pick the station location in the map.

Figura 6 - Exemplo da definição das variáveis para uma estação meteorológica no WindStation

1.2.4.4. Critério de convergência da simulação

Quando a simulação é realizada, a convergência dos valores residuais (resíduos normalizados das equações) desta é fundamental na qualidade dos resultados finais. A convergência é obtida quando os valores residuais descem abaixo do valor limite de convergência, como representado na figura 7.

O programa permite a alteração do valor limite de convergência para que se possa adequar o critério de convergência a cada simulação.

Existe ainda a possibilidade de limitar o número de iterações para casos onde os valores residuais estabilizam a cima do limite de convergência escolhido e as simulações se tornam muito longas (a simulação é parada quando atingida a estabilidade dos valores residuais, pois a partir desse momento não existe alteração significativa na qualidade dos resultados).

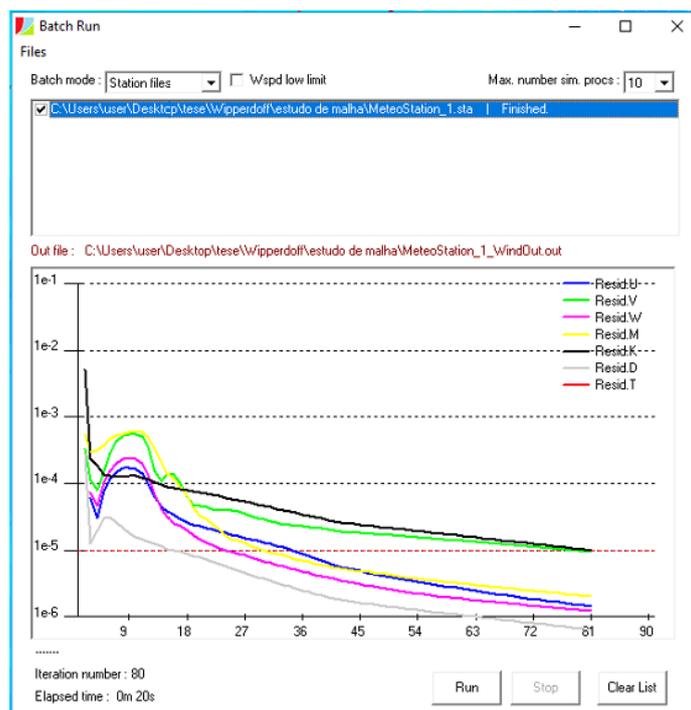


Figura 7 - Exemplo de convergência da simulação para o limite de convergência de $1e^{-5}$

1.2.5. Conceitos base do funcionamento do Windstation

1.2.5.1. Base do Programa

O software baseia o seu cálculo na resolução das equações de Navier-Stokes, da continuidade e energia, e possibilita, como já referido, a utilização de 4 modelos de turbulência diferentes.

Nesta parte da dissertação será dada uma breve descrição destas equações e dos possíveis modelos de turbulência, assim como de outros conceitos relacionados.

1.2.5.1.1. Equações de Navier-Stokes

A equação de Navier-stokes descreve a conservação de quantidade de movimento de um fluido, e a partir do manual do WindStation, a fórmula usada pelo programa é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma \left(2 \frac{\partial}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \text{div} \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_i} + S_{ui} + \rho g \beta (T - \theta) \quad (1.1)$$

em que o coeficiente de difusão Γ é dado por: $\Gamma = \mu_{eff} = \mu + \mu_t$

O programa possibilita a inclusão do efeito de Coriolis causado pela rotação da terra. Caso se deseje considerá-lo, é adicionado à equação um termo adicional em u ($i = 1$, direção Oeste - Este) e em v ($i = 2$, direção Sul - Norte), isto é:

$$\begin{aligned} S_{c1} &= -f_c * \rho * v \\ S_{c2} &= -f_c * \rho * u \\ S_{c3} &= 0 \end{aligned} \quad (1.2)$$

em que f_c representa o termo de Coriolis que é dado por: $f_c = 2\Omega \sin \lambda$, com Ω sendo a taxa de rotação da terra e λ a latitude local na equação (1.1).

O termo S_{ui} representa o coeficiente de porosidade e é utilizado em situações em que o escoamento atravessa obstáculos como árvores ou arbustos.

O último termo da equação é referente às forças de impulsão, onde θ [K] é a temperatura potencial (correspondente ao gradiente adiabático vertical de temperatura), θ_{ref} é a temperatura potencial de referência e $\beta = T^{-1}$ o coeficiente de expansão térmica (com T a representar a temperatura local em [K]).

1.2.5.1.2. Equação da continuidade

A equação da continuidade estabelece que existe conservação da massa para um sistema isolado quando um fluido se desloca de uma dada posição para outra e é dada por:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1.3)$$

1.2.5.1.3. Equação da energia

A equação da energia está escrita de modo a que a variável dependente seja a temperatura potencial. Esta estabelece que a energia total do sistema isolado permanece constante, e por isso apenas existe transformação de energia e não saída nem entrada. A equação é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho c_p u T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho c_p w T) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (1.4)$$

em que o coeficiente de difusão é:

$$\Gamma = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_\theta} \right) c_p \quad (1.5)$$

em que $Pr = 0.71$ e σ_θ representam respetivamente o número de Prandtl laminar e turbulento. O número de Prandtl turbulento depende do modelo de turbulência utilizado.

1.2.5.2. Modelos de Turbulência

As propriedades de um escoamento turbulento (velocidade, pressão, etc.) não são constantes no tempo, sendo, em vez disso, caracterizadas por oscilações em torno de um valor médio. O cálculo numérico de valores instantâneos não é possível, na maioria dos casos, com as técnicas e recursos de hoje em dia, devido às frequências espaciais e temporais que caracterizam estes escoamentos. Assim, é possível calcular apenas os valores médios através da decomposição de Reynolds:

$$\hat{\phi} = \phi + \phi' \quad (1.6)$$

em que $\hat{\phi}$ representa o valor instantâneo, ϕ é o valor médio e ϕ' é a diferença entre os dois anteriores (flutuação). Quando a decomposição de Reynolds é aplicada nas

equações de movimento e se toma a média destas, surgem novos termos, sendo a tensão a sua dimensão. Estes termos poderão ser expressos como o produto da viscosidade (viscosidade turbulenta) por um gradiente médio de velocidade (como no caso de tensões laminares - hipótese proposta por Boussinesq). O cálculo computacional da viscosidade turbulenta é realizado através de um modelo de turbulência. O software WindStation proporciona como já referido atrás, a possibilidade da utilização de 4 modelos de Turbulência:

- **O modelo Standard $k - \varepsilon$** , sendo ele o modelo mais versátil e de longe e o mais usado (Launder e Spalding, 1972, Launder e Spalding, 1974, Djilali et al., 1989).

Este modelo define a viscosidade turbulenta por:

$$\mu_t = C\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (1.7)$$

onde $k \left[\frac{m^2}{s^2} \right]$ representa a energia cinética de turbulência, que é uma medida da intensidade de turbulência do escoamento T_I :

$$T_I = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{V} \rightarrow k = \frac{2}{3}(T_I V)^2 \quad (1.8)$$

A taxa de dissipação da energia cinética de turbulência, $\varepsilon \left[\frac{m^2}{s^3} \right]$, está relacionada com a escala de comprimento de dissipação L_d dada por:

$$L_d = C_\mu^{3/4} \frac{k^3}{\varepsilon} \rightarrow \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^4}{L_d} \quad (1.9)$$

A energia cinética de turbulência e a sua taxa de dissipação são calculadas por equações de transporte, variando de modelo para modelo.

- **O modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$** , que se distingue pela sua maior precisão no cálculo de fluidos em escoamentos rápidos, através da adição de um termo extra na equação de dissipação.
- **O modelo de turbulência Realizable $k - \varepsilon$** , que foi desenvolvido com o fim de obter resultados mais precisos na separação da camada limite, escoamentos rotativos e escoamentos com curvaturas de linha de corrente agressivas.

- **O modelo de turbulência Limited-length $k - \varepsilon$** , quando aplicado na camada limite atmosférica, o modelo $k - \varepsilon$ tende a sobrecalcular os valores da escala comprimento e levando assim a valores de elevada viscosidade turbulenta. O modelo Limited-length $k - \varepsilon$ é baseado principalmente na proposta de Koblitz et al. (2013) a fim de resolver este problema.

Todos os modelos permitem a utilização de forças de Coriolis (sendo, no entanto, de utilização obrigatória no caso do último modelo).

Para informação mais detalhada, pode ser consultado o manual de utilizador do WindStation (Lopes 2018).

1.2.5.3. Integração Numérica

Para a solução numérica, as equações de movimento são transformadas da sua forma original, em coordenadas cartesianas, para um sistema de coordenadas generalizado utilizando a regra da cadeia (para melhor esclarecimento consultar Lopes et al.,1995). Após a transformação, as equações são discretizadas e integradas utilizando uma técnica de volume de controlo.

Para os termos de advecção, os valores nas faces dos volumes de controlo são calculados computacionalmente a partir dos valores centrais dos volumes de controlo vizinhos, através de esquemas de advecção. O software WindStation possibilita a escolha de 2 esquemas de advecção, a advecção Hybrid (de primeira ordem) e Quick (de terceira ordem). Esta escolha afeta a solução numérica final, sendo por isso mesmo objeto de estudo no decorrer desta dissertação.

2. CASO DE BOLUND

2.1. Apresentação do caso

O caso de Bolund irá funcionar como um teste ao software onde os resultados obtidos através do WindStation terão de ser validados através da comparação com dados experimentais recolhidos no local, resultados obtidos em estudos de túnel de vento e de outros softwares já publicados.

Bolund consiste numa ilha localizada na Dinamarca, perto da cidade de Roskilde e a 1 km a Norte de Risø DTU, que tem aproximadamente 12 metros de altura e 200 metros de comprimento (figura 8).



Figura 8 – Ilha de Bolund

(Fonte: Andreas Bechmann et al., 2009)

A ilha possui uma geometria bastante complexa pois apresenta zonas com superfícies muito irregulares (grande variação da altura para curta variação de posição) e zonas onde a superfície apresenta declives pouco elevados. Este caso é bastante usado no teste de modelos de simulação numérica de escoamentos (como o WindStation), precisamente pela complexidade da sua geometria.

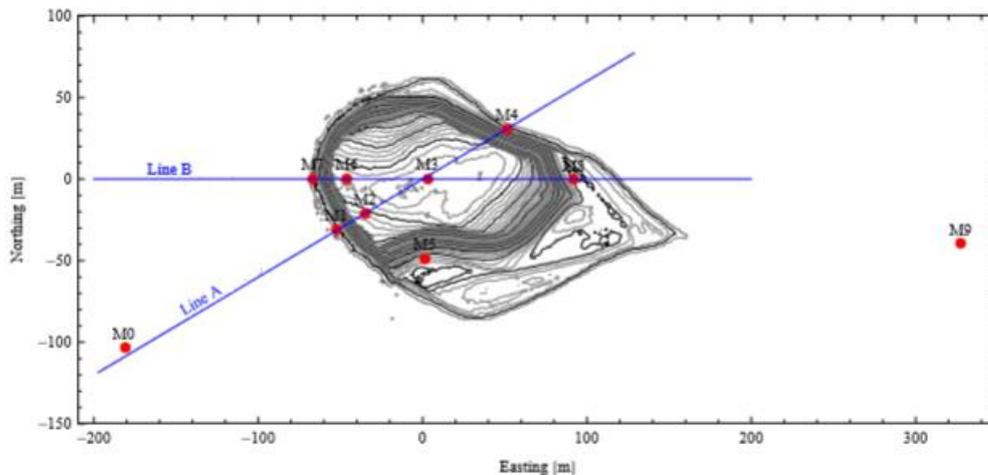


Figura 9 - Linhas de vento e posição dos mastros de medição no caso da ilha de Bolund

(Fonte: Andreas Bechmann et al., 2009)

O estudo realizado nesta dissertação baseou-se essencialmente na obtenção de resultados para 9 pontos (M0, M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9) e ao longo de duas linhas de direção de vento, a linha A (239°) e linha B (90°) do local (figura 9). Os pontos representam a localização de mastros de medição, colocados no terreno para a recolha de dados num estudo realizado em 2007/2008, e que teve por base a medição e simulação para quatro linhas de direção de vento diferente (90°, 255°, 239° e 270°).

A escolha das linhas a estudar nesta dissertação deveu-se meramente à quantidade de informação disponível sobre cada uma, sendo as escolhidas aquelas mais propícias ao objetivo deste capítulo.

Para isto, após a introdução da topografia e rugosidade no programa, foi realizado:

- O estudo da influência da malha horizontal com uma largura de 5, 2 e 1 metros;
- O estudo da influência da malha vertical com 50 níveis e a variar a altura do primeiro nodo, sendo 0.2, 0.1 e 0.05 metros do solo as alturas utilizadas;
- O estudo da influência do modelo de turbulência, utilizando 3 modelos: Standard κ - ϵ , RNG κ - ϵ , Realizable κ - ϵ ;

- O estudo da influência da variação do esquema de advecção, tendo para isto ter sido utilizados os esquemas Híbrido e Quick.

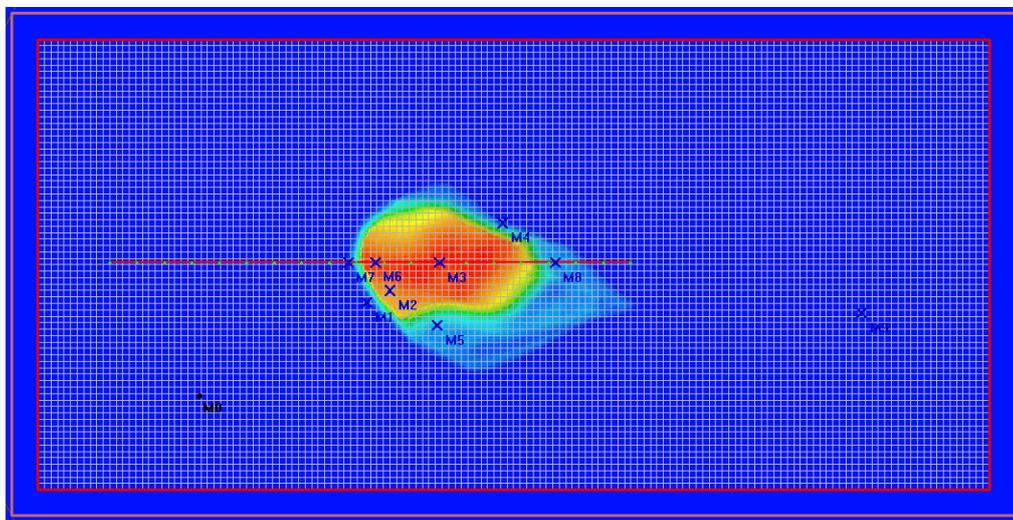


Figura 10 - Domínio utilizado no Software WindStation no caso de Bolund

O ponto M0 foi utilizado como o ponto de introdução das condições fronteira, condições estas que se assemelham o mais possível aos estudos já realizados para que os resultados fossem os mais precisos possível. Uma representação do domínio utilizado e dos dados de condições fronteira principais, estão respetivamente nas figuras 10 e 11.

Direção de Vento [°]	Intensidade de Vento [m/s]	Altura ao solo [m]	z_0 [m]
270	10	5	0.0003
255	10	5	0.0003
239	10	5	0.0003
90	6	5	0.015

Figura 11 - Condições Fronteira

A validação do caso é feita ao longo dos quatro estudos referidos anteriormente que serão divididos pelos subcapítulos 2.2,2.3 e 2.4.

2.2. Estudo da variação da malha

A obtenção de resultados para malhas de diferentes dimensões tem como principais objetivos a determinação do valor de malha mínimo para o qual não vale apenas

refinar mais o seu tamanho, e estudar a variação dos resultados com a variação deste parâmetro. Ao mesmo tempo, os resultados serão comparados com os resultados experimentais para as mesmas localizações.

2.2.1. Malha Horizontal

Foram simulados resultados para as linhas de 90° e 239° a 5 metros do solo, com malhas de 1m, 2m e 5 metros. Os resultados foram posteriormente exportados para folhas Excel, seguindo-se de um tratamento destes para a criação de gráficos. Os resultados obtidos podem ser visualizados nas figuras 12 e 13.

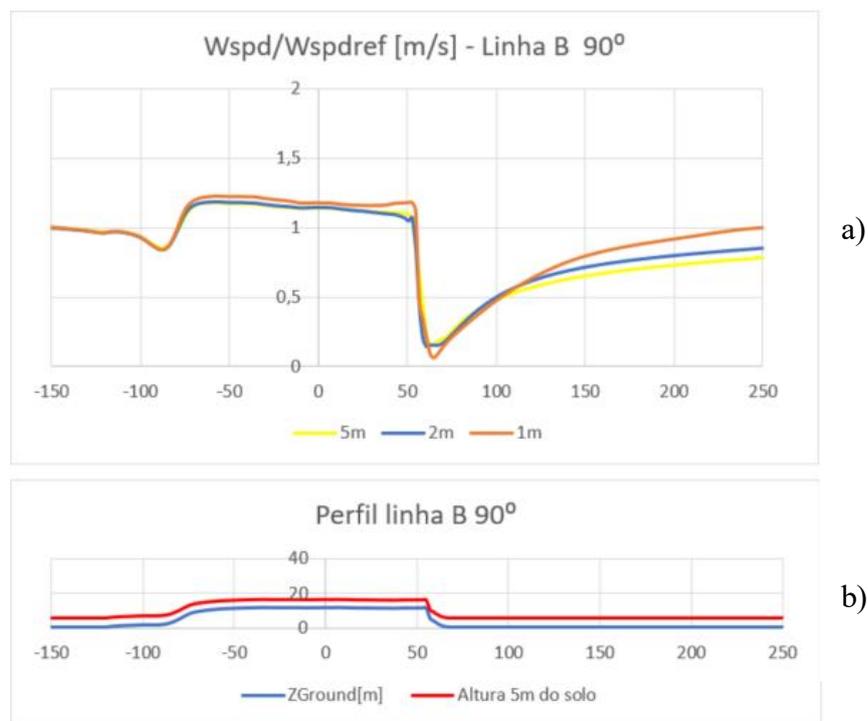


Figura 12 - Resultados para os valores de malha de 5m,2m e 1m: a) Distribuição da divisão entre a velocidade obtida na simulação pelo valor de referência medido experimentalmente em M9 ao longo da linha B; b) Perfil horizontal da linha B

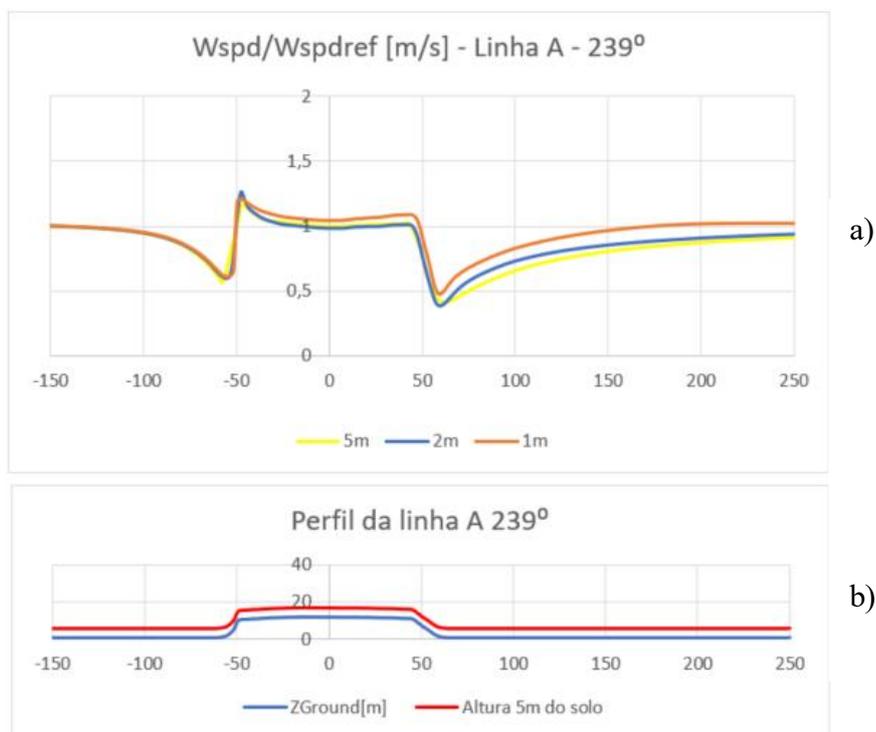


Figura 13 - Resultados para os valores de malha de 5m,2m e 1m: a) Distribuição da divisão entre a velocidade obtida na simulação pelo valor de referência medido experimentalmente em M0 ao longo da linha B; b)Perfil horizontal da linha B

A abreviação Wspd corresponde à velocidade de vento em [m/s] simulada pelo programa a 5 metros do solo, enquanto que Wspdref corresponde à velocidade de referência em [m/s], que para o caso da linha A corresponde ao valor medido experimentalmente em M0 e para a linha B corresponde ao valor semelhante no ponto M9 (ambas a 5 metros do solo).

A partir destes resultados é possível concluir que para qualquer valor de malha, dentro da gama utilizada, os resultados obtidos não terão variações significativas, pelo que se conclui que a gama de malha utilizada já se encontra otimizada e não vale a pena diminuir mais o tamanho desta para futuras simulações.

Para melhor compreensão destes valores e teste do programa, foram comparados com os resultados obtidos noutros estudos e medições experimentais realizadas no local, sobrepondo os gráficos obtidos uns aos outros.

Nas figuras 14 e 15 apresentam-se os resultados recolhidos de outros estudos e medições experimentais, e posteriormente nas figuras 17 e 18 a sobreposição.

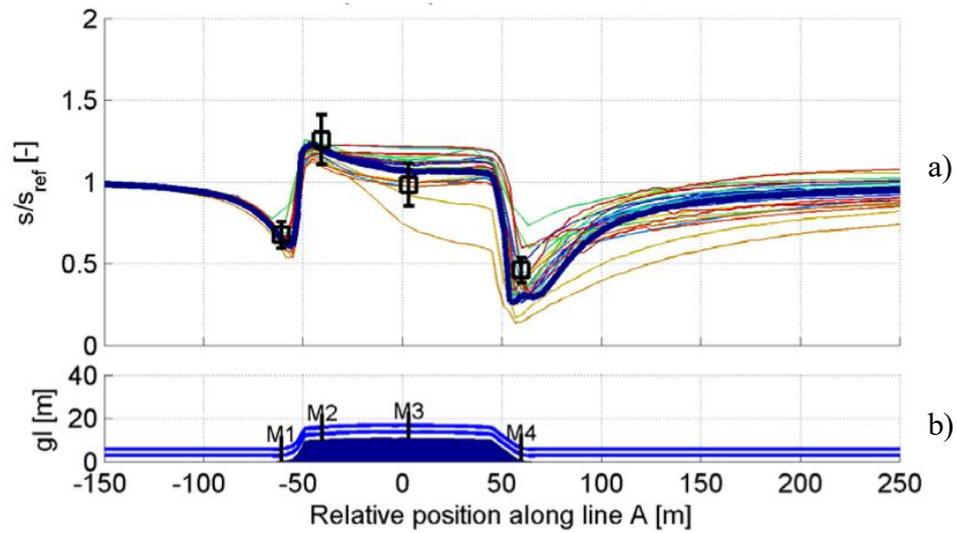


Figura 14 – Resultados adquiridos do estudo de Sørensen (2010): a) Distribuição da divisão entre a velocidade obtida na simulação pelo valor de referência medido experimentalmente em M0 ao longo da linha A; b) Perfil horizontal da linha A com linhas representativas das medições a 3 e a 5 metros do solo

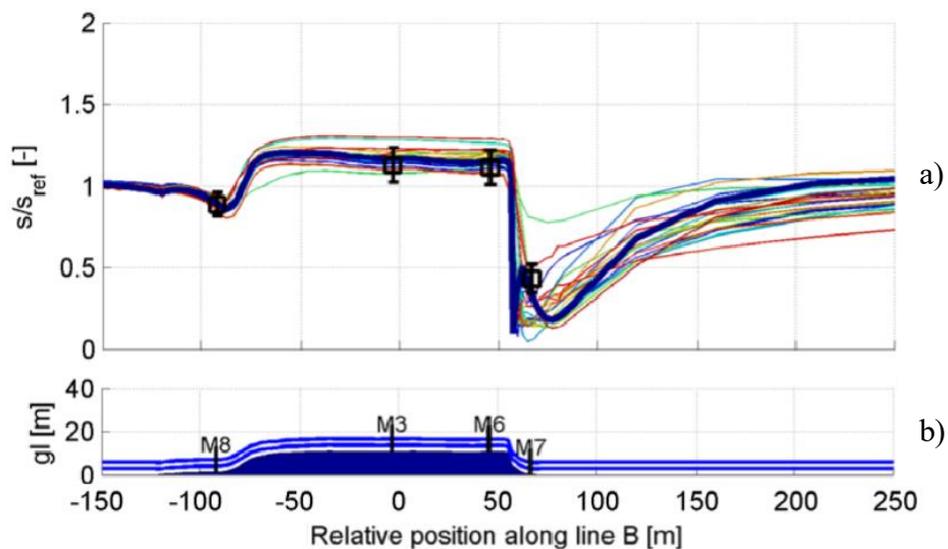


Figura 15, 16 – Resultados adquiridos do estudo de Sørensen (2010): a) Distribuição da divisão entre a velocidade obtida na simulação pelo valor de referência medido experimentalmente em M9 ao longo da linha B; b) Perfil horizontal da linha B com linhas representativas das medições a 3 e a 5 metros do solo

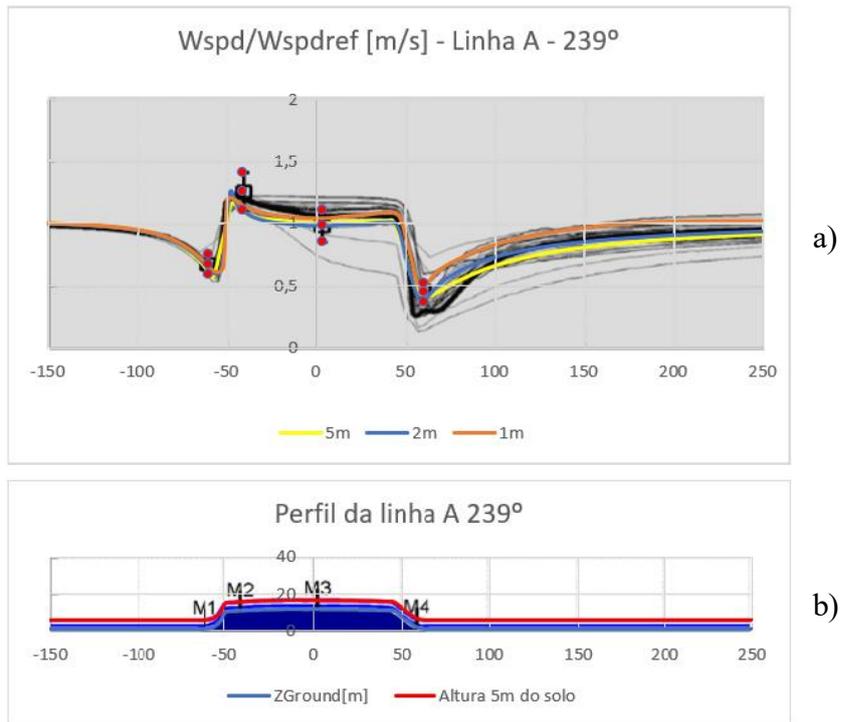


Figura 17 - Sobreposição de Resultados Linha A: a) Velocidade por Velocidade de Referência; b) Perfis horizontais

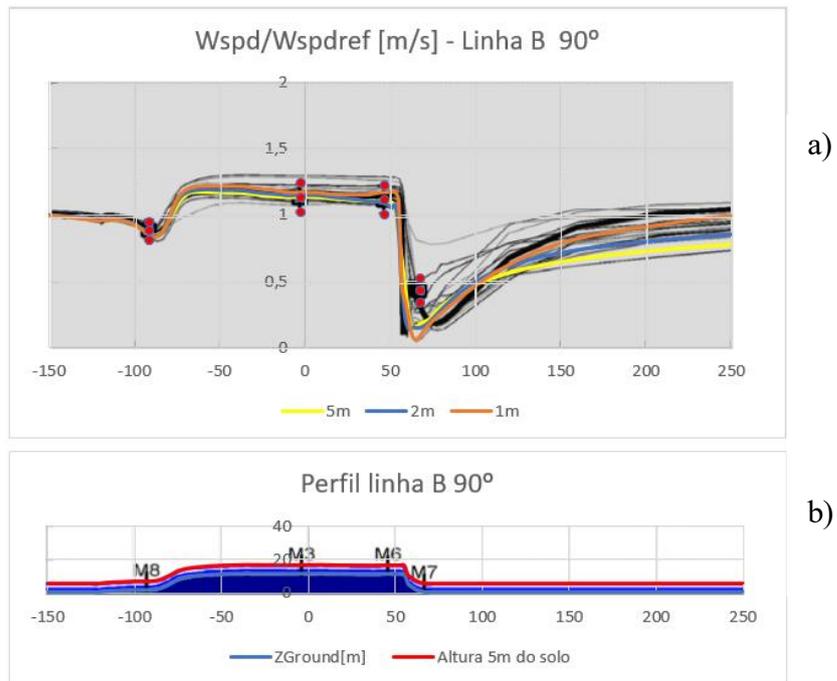


Figura 18 - Sobreposição de Resultados Linha B: a) Velocidade por Velocidade de Referência; b) Perfis horizontais

Os pontos vermelhos representam os resultados medidos experimentalmente local, onde no conjunto de cada 3 pontos verticalmente alinhados o ponto central representa

a velocidade instantânea medida e os outros dois o desvio padrão. Os resultados adquiridos do estudo de Sørensen (2010) foram editados para uma escala de cinza para facilitar a análise final.

Analisando as sobreposições (figuras 17 e 18), e com base no que já se sabia do estudo de malha inicial, retiram-se as seguintes conclusões:

- **Utilização da malha horizontal de 1m como referência para futuras simulações.** Esta conclusão advém do facto de, em geral, os resultados obtidos na simulação para 1 m serem os mais próximos dos resultados obtidos no estudo de comparação, e por estes se manterem concisos com os resultados medidos experimentalmente. Além disto de forma geral, quando mais refinada a malha melhores serão os resultados, contando assim também como um fator favorável à escolha.
- **Os resultados obtidos são precisos.** Dentro da gama de malhas utilizadas, de forma geral, os resultados obtidos coincidem tanto com os dados medidos experimentalmente como com os resultados do estudo de comparação.
- **Dificuldade na previsão dos resultados para o ponto M7.** Contrariamente ao que acontece no restante domínio de comparação, em torno do ponto M7, os resultados não coincidem nem com os dados medidos experimentalmente nem com o estudo utilizado para comparação. Isto poderá ser devido à complexidade do terreno neste ponto, que dificulta o cálculo computacional originando uma variação comum nos resultados de todas as malhas utilizadas, quase como um arredondamento.

2.2.2. Malha vertical

A variação da malha vertical fez-se alternando a distância do primeiro nodo ao solo, isto é, o número de níveis a utilizar não varia (foram utilizados 50 níveis) apenas a sua distância ao solo.

Foram utilizadas 3 distâncias ao solo para o primeiro nodo (0.05 metros, 0.1 metros e 0.2 metros) no cálculo, obtenção e tratamento de resultados em 4 linhas verticais situadas nos pontos M1, M2, M3 e M4, ao longo da direção 239°.

O método de estudo será semelhante ao utilizado para a malha horizontal, pelo que os resultados apresentados serão já os finais com a sobreposição com estudo de

Bechmann et al. (2011). Esta representação será feita na figura 19 onde as linhas a cores são os dados obtidos no WindStation e as a cinzento os dados do estudo referido.

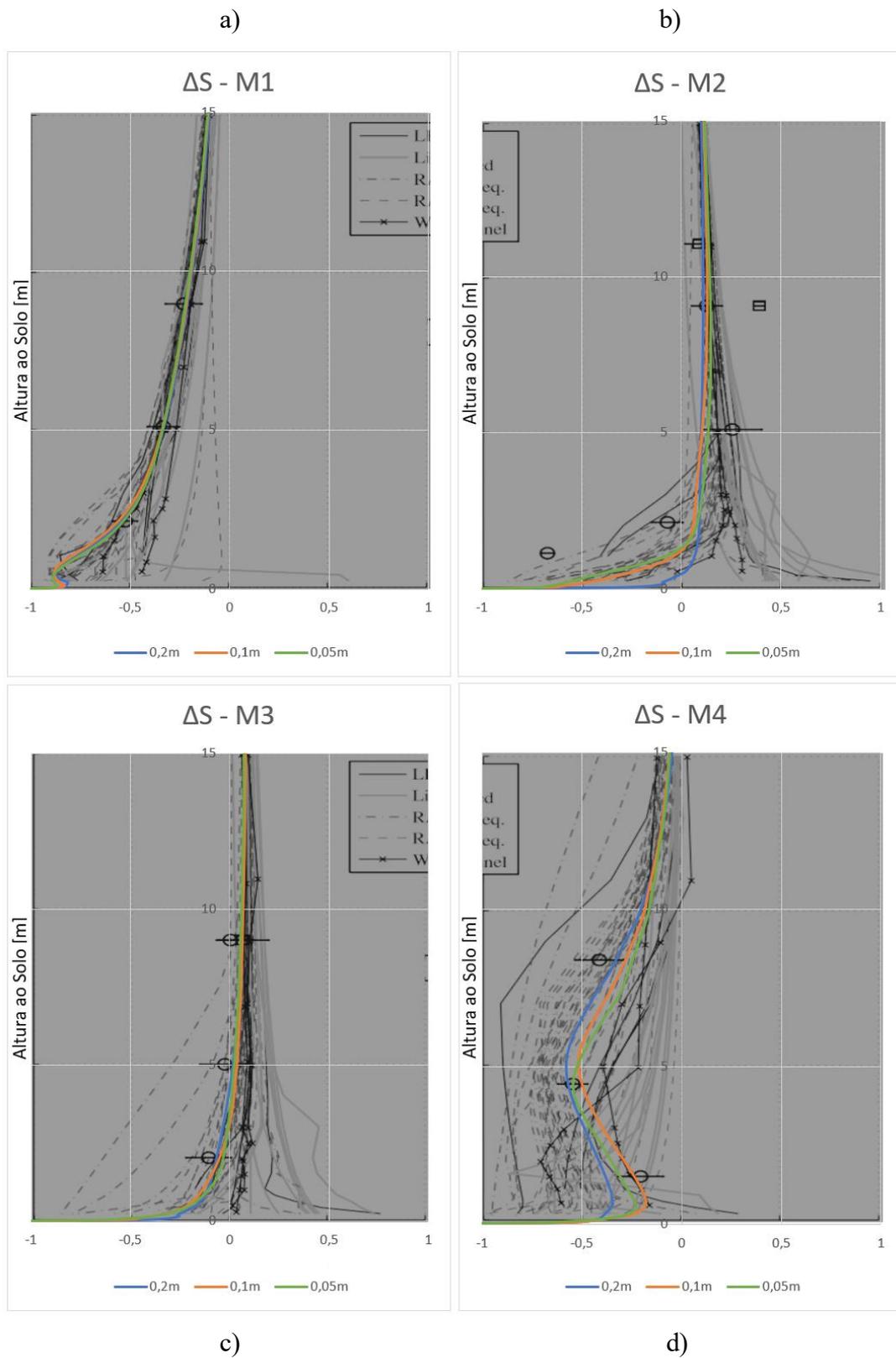


Figura 19 – ΔS com altura para diferentes malhas verticais nos pontos: a) M1; b) M2; c) M3; d) M4; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Andreas Bechmann et al. (2011).

A variável ΔS corresponde a um valor adimensional que é dado pela seguinte expressão:

$$\Delta S = \frac{V_{instantânea\ z} - V_{M0\ z}}{V_{M0\ z}} \quad (2.1)$$

em que $V_{M0\ z}$ corresponde à velocidade no ponto M0 a uma dada altura z e $V_{instantânea\ z}$ corresponde à velocidade simulada no ponto a calcular (M1, M2, M3 ou M4) para a mesma altura.

Da análise dos gráficos da figura 19 é possível concluir:

- **A gama de malhas utilizada apresenta resultados concordantes entre si**, pelo que não vale a pena reduzir mais a distância do primeiro nodo.
- **Os resultados obtidos podem ser considerados fiáveis**. Dentro da gama de malhas utilizadas, de forma geral, os resultados obtidos são concordantes tanto com os dados medidos experimentalmente (representados pelos círculos com travessão horizontal no gráfico) como com os resultados do estudo de comparação, apesar de estes últimos se apresentarem um pouco confusos e os resultados no ponto M3 não atingirem os dados medidos experimentalmente em todos os pontos.
- **Utilização da malha vertical de 0.05m como distância ao solo do primeiro nodo, como referência para futuras simulações**. Os resultados desta malha, apresentam-se como sendo os mais próximos dos dados medidos experimentalmente em todos os pontos calculados.
- **Existência de um desvio significativo no ponto M2 dos dados experimentais**. Isto poderá dever-se a fatores relacionados com o programa ou outros externos, mas visto que os resultados do WindStation coincidem com os resultados simulados do estudo comparativo (não coincidindo ambos com os valores medidos), pode-se afirmar que os modelo de cálculo estará certo, levando assim à ideia que a causa deste erro estará em fatores externos ao Software, ou seja poderá estar na realização da medição experimental ou poderá ser devido às simulações serem realizadas em regime estacionário, etc.

2.3. Influência do modelo de turbulência

Na realização deste estudo, foram utilizados os conhecimentos dos subcapítulos anteriores, ou seja, foi utilizado como valor de malha horizontal e malha vertical os valores de 1m e 0.05m respetivamente.

O objetivo deste subcapítulo é determinar se existe uma mudança significativa no comportamento dos resultados utilizando três dos modelos de turbulência disponibilizados no WindStation.

Para isto foram calculados resultados ao longo da linha A de direção 239° (a 5 metros do solo e por isso designados de resultados horizontais) e resultados em quatro pontos (M1, M2, M3, M4) variando com a altura ao solo (designados de resultados verticais), possibilitando assim a comparação dos modelos de turbulência nas componentes horizontal e vertical.

Da mesma maneira que os estudos anteriores, os resultados serão comparados com os resultados do estudo de Bechmann et al. (2011), na forma de sobreposição de gráficos onde as linhas a cores são os dados obtidos no WindStation e as a cinzento os dados do estudo referido.

Para a apresentação dos resultados foi utilizado o parâmetro adimensional ΔS (apresentado na Eq (2.1)), o parâmetro adimensional Δk e o parâmetro Deflexão [°]. Estes são dados por:

$$\Delta K = \frac{TKE_{instantânea_z} - TKE_{M0_z}}{V_{M0_z}^2} \quad (2.2)$$

$$Deflexão[^\circ] = Direção\ em\ M0_z - Direção\ instantânea_z \quad (2.3)$$

em que V_{M0_z} corresponde à velocidade no ponto M0, TKE_{M0_z} à energia cinética de turbulência no ponto M0, e $TKE_{instantânea_z}$ à energia cinética de turbulência no local desejado. Tudo para uma dada altura ao solo z (o mesmo se aplica à deflexão).

Neste subcapítulo, irão ser apresentados apenas alguns dos resultados calculados (figuras 20 e 21), estando os restantes presentes na secção [APÊNDICE A].

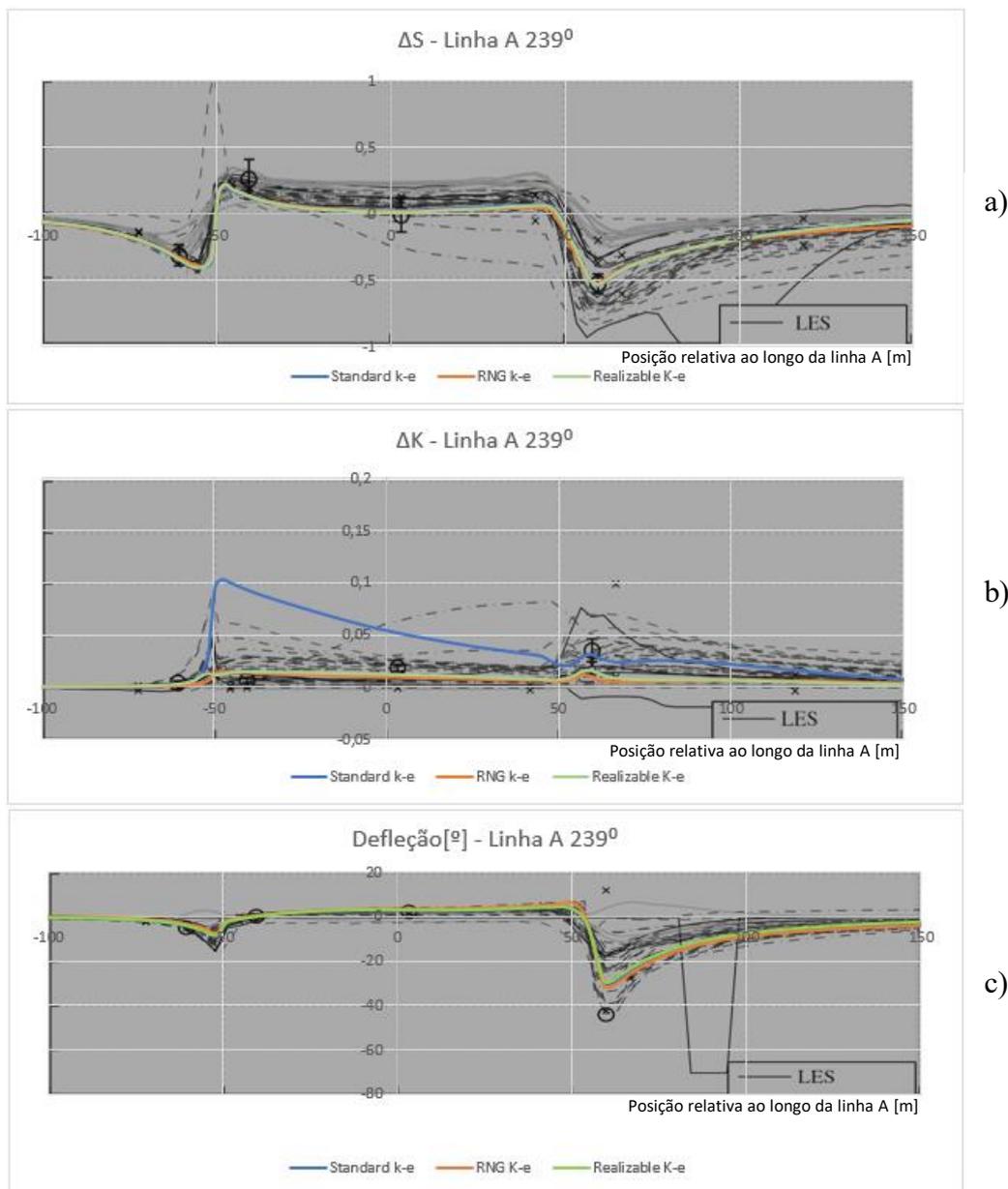


Figura 20 - Resultados ao longo da linha A 239⁰ para diferentes modelos de turbulência: a) ΔS ; b) Δk ; c) deflexão tomando a direção em M0 como referência; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).

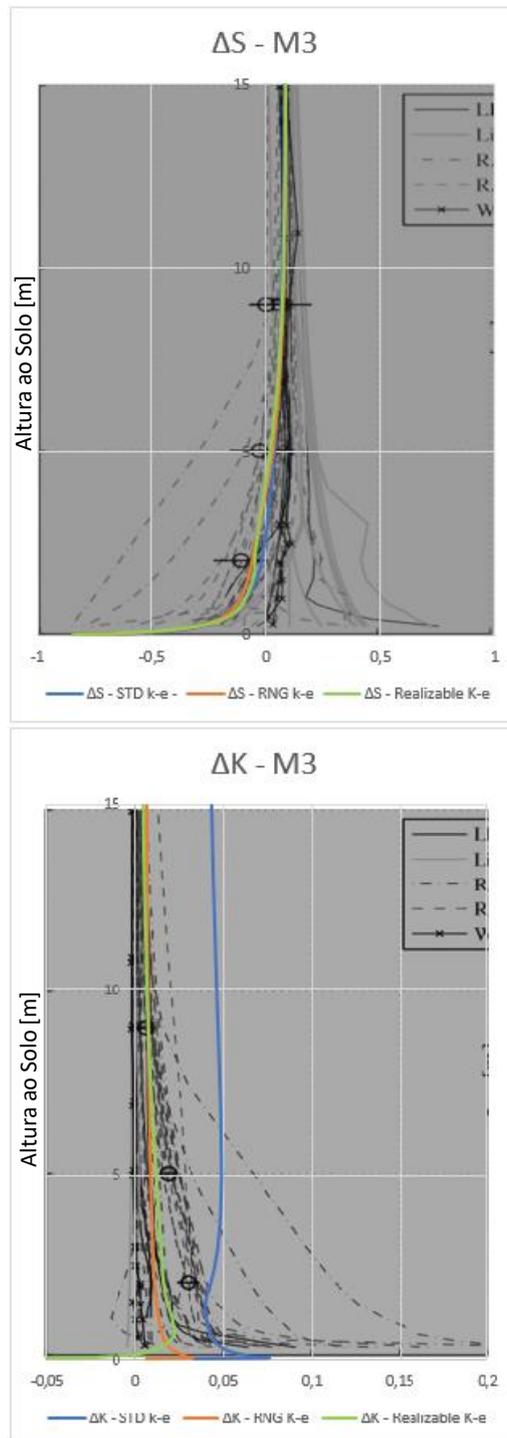


Figura 21 - Resultados Verticais no ponto M3, para diferentes modelos de turbulência: a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Andreas Bechmann et al. (2011).

Da análise dos resultados obtidos no estudo é possível concluir:

- **Todos os modelos testados apresentam resultados precisos em termos de velocidade e direção do vento.** A sobreposição dos resultados, tanto horizontais como verticais, demonstra grande proximidade entre os resultados obtidos com o WindStation, os resultados do estudo de comparação e os resultados medidos experimentalmente (representados pelos círculos nos gráficos).
- **Existência de um erro no cálculo do parâmetro TKE com o modelo Standard $k - \epsilon$.** Os resultados do parâmetro Δk dos outros modelos de turbulência são concordantes com os do estudo de comparação e com os experimentais (provando assim a precisão destes), havendo apenas variação no modelo Standard $k - \epsilon$. Para além disto, o facto de nos outros parâmetros (ΔS e Deflexão) os resultados do modelo Standard $k - \epsilon$ concordarem com os dos outros modelos e só diferirem no Δk , reforça a conclusão referida.
- **De modo geral, os modelos de turbulência estudados demonstram-se bastante fiáveis e concordantes entre si, na maioria dos parâmetros estudados.** Cada modelo de turbulência é indicado para determinada situação, como referido na introdução, pelo que por esse motivo deveria haver uma variação significativa nos resultados. A inexistência desta variação poderá ser devida ao facto do domínio a estudar (ilha de Bolund) ter dimensões bastante reduzidas, e não produzir variações significativas nos parâmetros para que se criem as situações ideais para os modelos de turbulência. Por outro lado, estes resultados apontam para que qualquer que seja o modelo a utilizar, os resultados serão promissores.

2.4. Estudo da variação do esquema de advecção

Como já referido o software WindStation disponibiliza 2 tipos de esquemas de advecção (Hybrid e Quick).

Para estudar a variação entre estes, foram obtidos resultados que permitiram a criação de gráficos onde se apresentam, para cada parâmetro, os resultados de cada modelo de turbulência em função do esquema de advecção. Foram utilizados os três modelos de turbulência do estudo anterior, com os mesmos dados de entrada e para as mesmas localizações (à exceção dos resultados verticais onde apenas se obtiveram resultados para o ponto M2).

Da mesma maneira que os estudos anteriores, os resultados serão comparados com os resultados do estudo de Bechmann et al. (2011), na forma de sobreposição de gráficos (figura 22 e 23) onde as linhas a cores são os dados obtidos no WindStation e as a cinzento os dados do estudo referido. Apenas serão apresentados alguns dos resultados calculados, estando os restantes presentes na seção [APÊNDICE A].

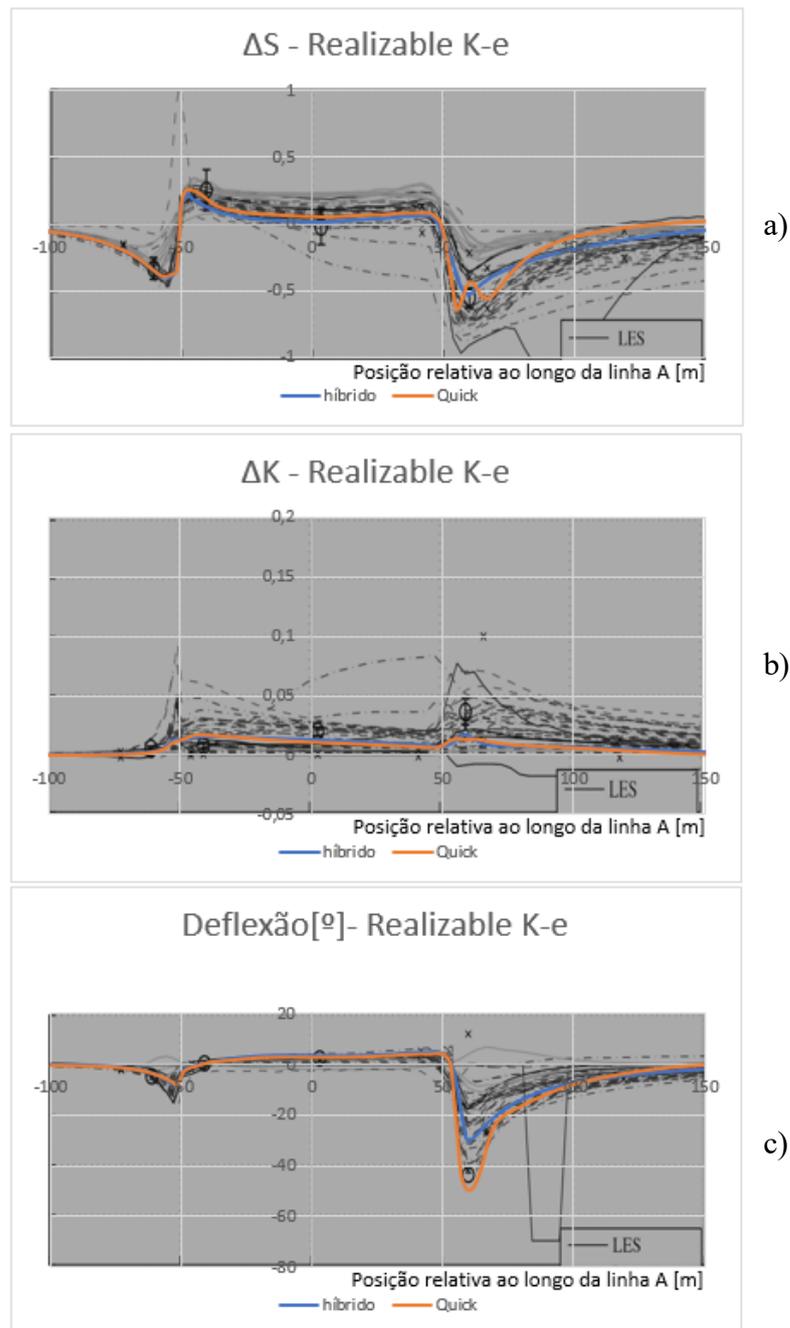


Figura 22 - Resultados ao longo da linha A 239° para diferentes esquemas de advecção utilizando o modelo de turbulência Realizable k - ϵ : a) ΔS ; b) Δk ; c) deflexão tomando a direção em MO como referência; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).

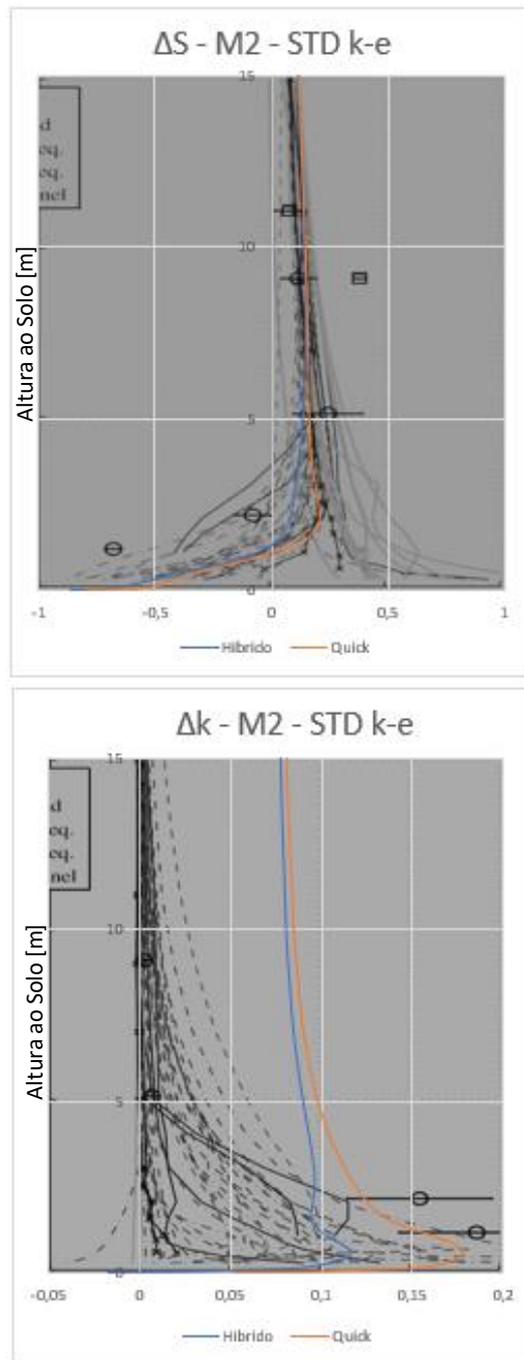


Figura 23 - Resultados Verticais no ponto M2, para diferentes esquemas de advecção, para o modelo de turbulência Standard $k - \epsilon$: a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).

Analisando os resultados é possível concluir:

- **De modo geral, os esquemas de advecção estudados demonstram-se bastante fiáveis e concordantes entre si na maioria dos parâmetros estudados.** Apesar de algumas variações, de modo geral o comportamento dos resultados é concordante para os dois esquemas, sendo que o Quick se apresenta um pouco mais preciso. Ambos coincidem de maneira bastante aceitável com os resultados experimentais e com os do estudo de comparação, sendo por isto possível afirmar que utilizando qualquer um dos esquemas para este caso, os resultados serão promissores. Por outro lado, tal como para os modelos de turbulência, não existe uma variação muito significativa nos resultados, podendo ser a razão para isso a mesma indicada no estudo anterior (tamanho reduzido do domínio em estudo).
- **Existência de um erro no cálculo do parâmetro TKE com o modelo Standard $k - \epsilon$.** Tal como no estudo anterior, os resultados da energia cinética de turbulência desviam-se de todos os outros, comprovando assim a existência do erro já referido no subcapítulo anterior.

2.5. Observações

Para este subcapítulo reserva-se uma pequena enumeração de algumas alterações em parâmetros do WindStation que resultaram em atualizações deste. Estas novas versões do programa visaram a resolução de problemas encontrados ou aperfeiçoamento no/do WindStation.

Dentro deste âmbito destacam-se duas situações:

- **Diminuição do valor mínimo na altura máxima de domínio vertical.** Para possibilitar a obtenção de resultados mais precisos para casos onde o domínio é de pequenas dimensões, como o caso de Bolund, foi executada uma atualização onde se diminuiu o valor mínimo na altura máxima do domínio de cálculo de 1200 metros para 300 metros de altura.
- **Atualização do programa com o fim de suavizar as alterações dos parâmetros atmosféricos em mudança topográficas muito bruscas.** Esta alteração no programa teve por base a suavização das alterações bruscas da malha, resultantes de mudanças agressivas na topografia. Desta maneira, os resultados computacionais

dos diversos parâmetros atmosféricos (velocidade de vento, TKE, etc), sofrem nestes pontos críticos, uma suavização na sua curva semelhante à que ocorre na realidade, produzindo-se assim resultados mais fiáveis.

-

3. CASO DO PARQUE EÓLICO

Este caso consiste na obtenção de resultados com o software WindStation e posterior comparação destes com aos valores medidos experimentalmente enviados pela empresa Menzio GmbH. Pretende-se validar o caso começando por um pequeno estudo de malha e seguindo-se a obtenção de resultados.

Este caso tem como alvo um parque eólico no Norte de França. Com este estudo será possível obter a distribuição de ventos e outras variáveis para o domínio em questão, podendo assim concluir sobre a fiabilidade do WindStation como possível ferramenta para o projeto de futuros parques eólicos.

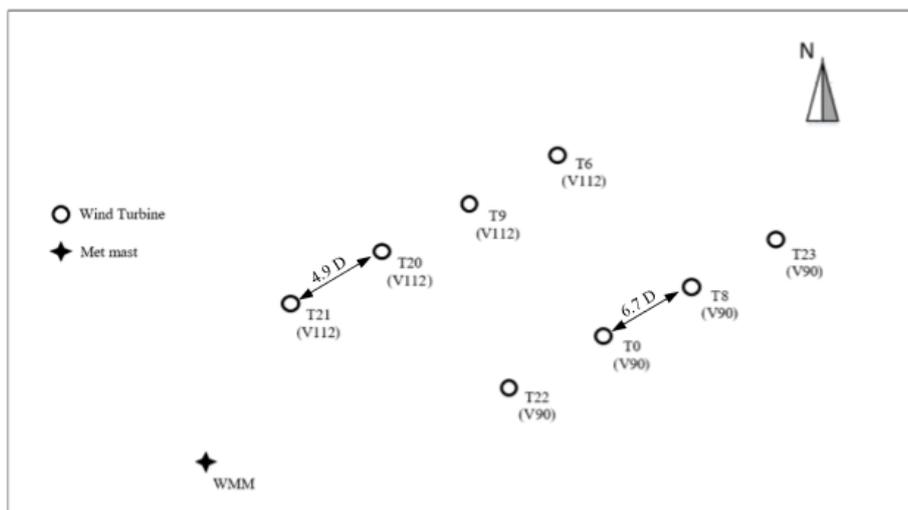


Figura 24 - Distribuição dos componentes intervenientes do caso parque eólico
 Fonte: Vicente (2018)

Para este caso são dadas as localizações de 8 turbinas, cada uma delas equipada com dispositivos de medição de parâmetros atmosféricos, e de um mastro de medição com medidores a 5 alturas diferentes (40m, 60m, 80m, 99m e 101m), como representado na figura 24. Foram medidas as condições atmosféricas em cada um desses pontos, de 10 em 10 minutos ao longo de um mês (desde 1/8/2016 às 00:00:00 até 31/08/2016 às 23:50:00, havendo assim cerca de 4500 medições por local de medição).

No presente estudo apenas se considerou os resultados de dois dias (desde 1/8/2016 a 3/8/2016 as 0:00horas) e as direções de vento no qual os resultados não seriam afetados pelas perturbações no vento criadas pelas turbinas (devido a isto, foi feita uma filtragem dos dados experimentais ficando-se apenas com as medições de vento limpo).

3.1. Estudo de Malha

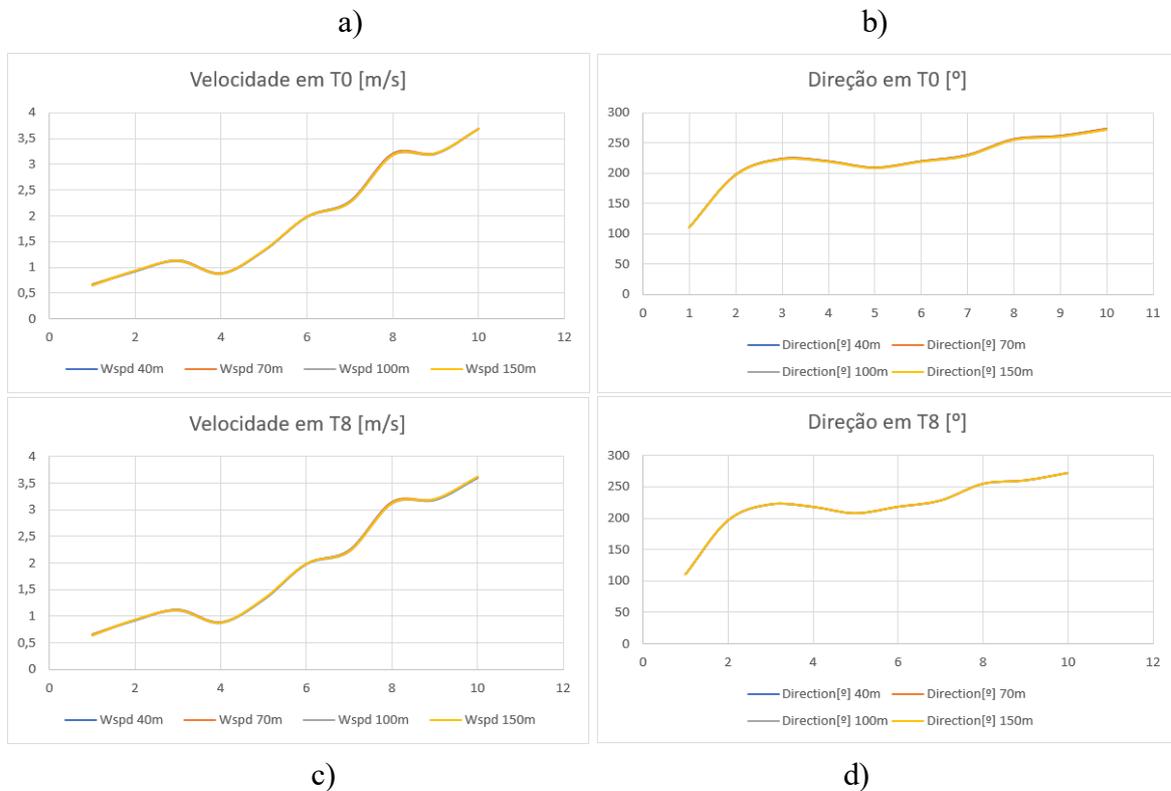


Figura 25 – Estudo de malha do caso parque eólico para o parâmetro: a) Velocidade do vento na turbina T0; b) Direção do vento na turbina T0; c) Velocidade do vento na turbina T8; d) Direção do vento na turbina T8

Começou-se por realizar um estudo de malha (desta vez apenas para a malha horizontal, que devido à grande dimensão do domínio e valores de rugosidade, proporcionam que a variação da malha vertical não tenha um efeito significativo) para a determinação do valor de malha limite para o qual a sua refinação não terá mais influência significativa nos resultados, dando assim para encontrar o valor de malha a utilizar. Para isto, foram simulados resultados para as turbinas T0 e T8, utilizado 4 tipos de tamanho de malha diferentes (40m, 70m, 100m e 150m), durante um intervalo de tempo de 1 hora e 30 minutos e criando assim 10 resultados para cada parâmetro (figura 25). Os parâmetros utilizados neste estudo foram a velocidade de vento e a direção de vento.

3.2. Análise dos resultados obtidos e estudo da influência da posição de introdução das condições fronteira

Para o estudo deste caso e obtenção dos resultados, foram realizadas simulações com pontos de introdução das condições fronteira em locais distintos, para assim melhor perceber os resultados e a sua comparação com os resultados experimentais e ao mesmo tempo aferir quanto à influência da posição das condições fronteira iniciais, na precisão dos resultados finais.

Os locais escolhidos foram o mastro de leitura WMM (a 101 metros de altura) e a turbina T20. (Idealmente, a utilização de todas as turbinas e mastros de medição como locais introdutórios de condições fronteira em simulações diferentes e a sua posterior comparação, daria a resposta mais precisa neste assunto. No entanto como o objetivo principal é validar o programa, e o estudo da influência da posição de introdução das condições fronteira é secundário, trabalhou-se apenas com uma amostra).

Serão apenas apresentados alguns dos gráficos e resultados (figura 26,27,28,29 e 32), sendo que os restantes se encontram na secção [APÊNDICE B].

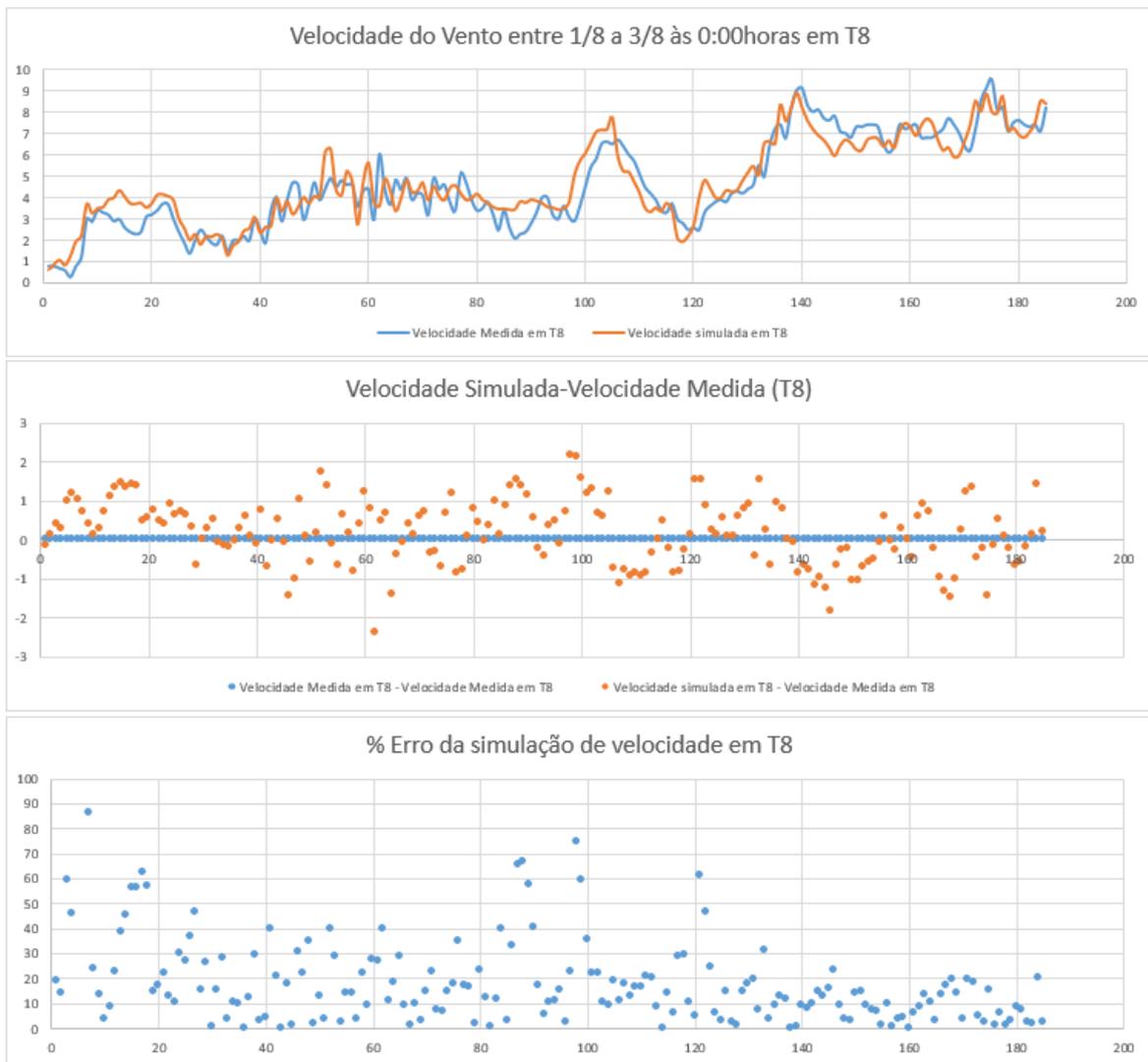


Figura 26 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente, para o parâmetro Velocidade do Vento na turbina T8, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro WMM a 101 metros de altura.

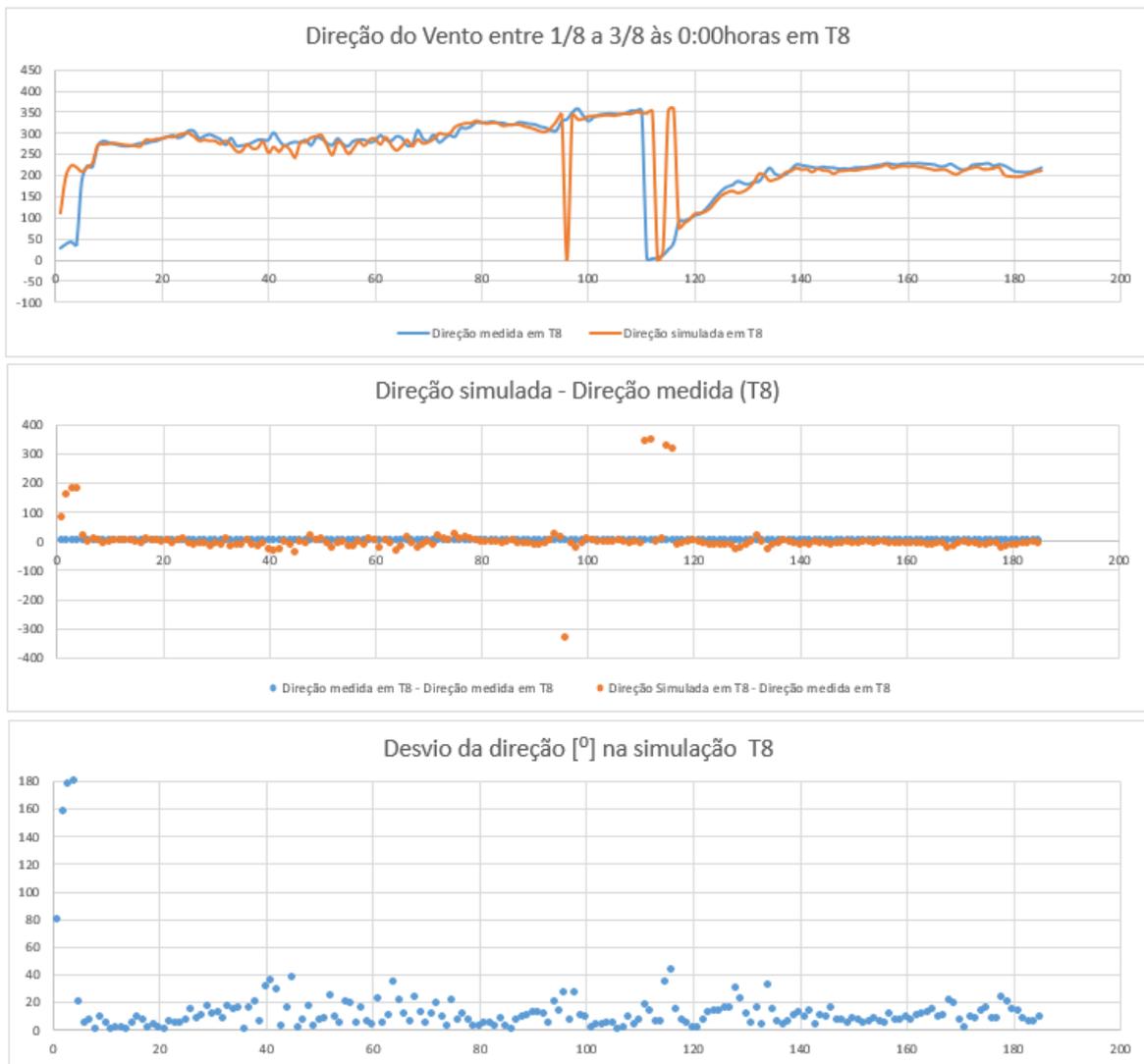


Figura 27 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente, para o parâmetro Direção do Vento na turbina T8, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro WMM a 101 metros de altura.

Para cada localização (mastros e turbinas) foram obtidos resultados como os apresentados nas figuras 26 e 27, tendo sido ainda calculados os desvios médios e erros médios em cada localização (apresentados mais a frente nesta dissertação e que consistem na variação que existe entre os resultados experimentais e os simulados, avaliado em [%] para o caso da velocidade e em [°] para a direção do vento). Desta maneira, possibilita-se medir a precisão da simulação em cada ponto e a precisão geral do programa.

Seguem-se então mais alguns resultados significativos ao estudo.

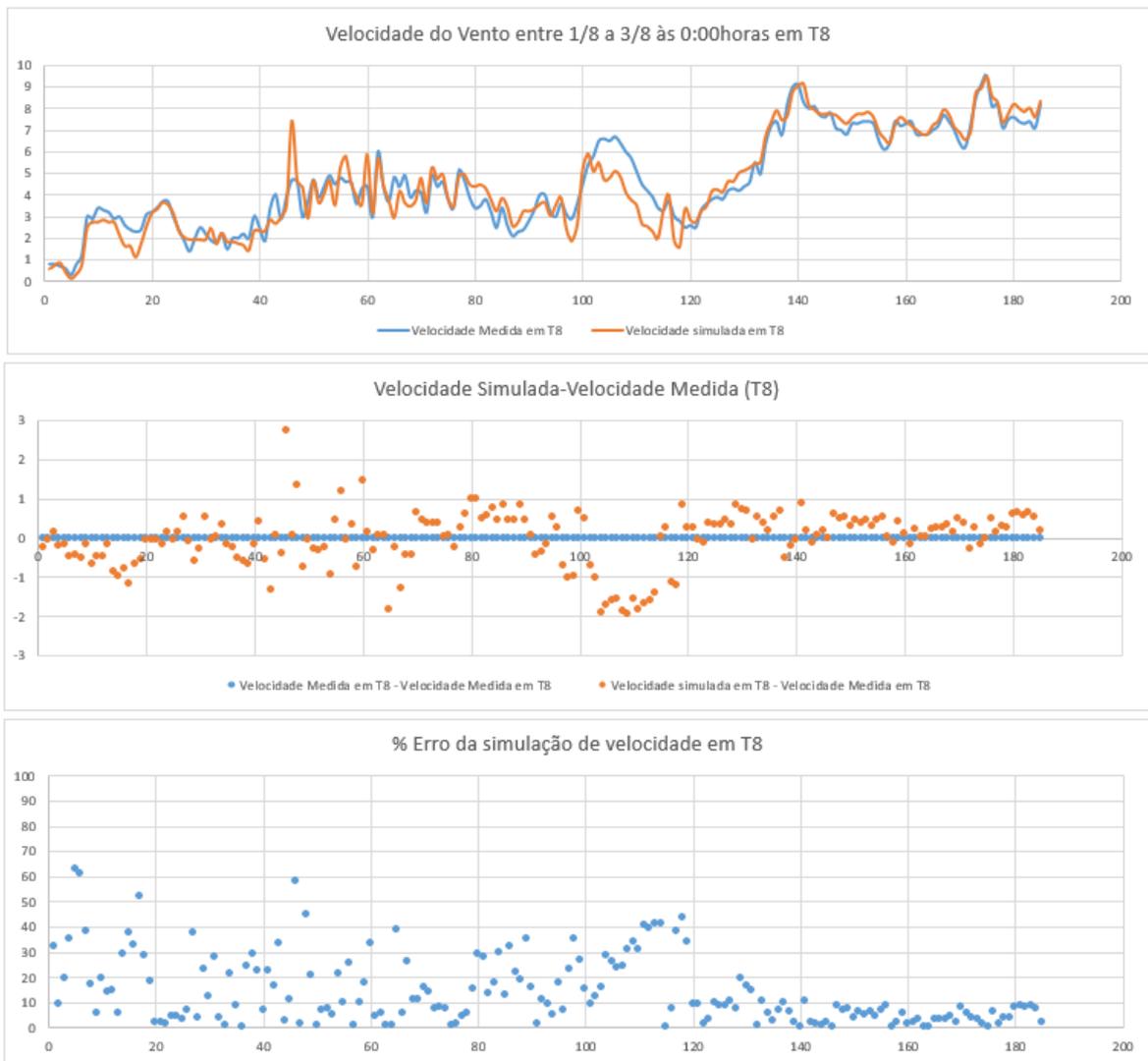


Figura 28 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente, para o parâmetro Velocidade do Vento na turbina T8, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição da turbina T20



Figura 29 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente, para o parâmetro Direção do Vento na turbina T8, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição da turbina T20

Desde já, a partir de uma breve análise destes gráficos é possível concluir:

- **Existência de um desfasamento temporal com os resultados experimentais.** É notório que as curvas dos resultados simulados são semelhantes em ambos os parâmetros às curvas dos resultados experimentais, mas de forma geral estão desfasadas, ou seja, os “picos” dos gráficos não se dão no mesmo instante, mas sim em instantes próximos. Isto poderá ter a ver com o facto de a simulação ser realizada em regime estacionário o que nas medições não acontece, ou seja, não se é tido em conta o tempo que o ar medido num local demora a chegar ao outro, provocando assim um desfasamento nos resultados.

Apresenta-se a comparação direta entre os resultados, diferindo o local de introdução das condições fronteira nas figuras 30,31 e 32.

Local	Condições Fronteira iniciais em WMM	Condições Fronteira iniciais em T20
	Erro médio velocidade do vento[%]	Erro médio velocidade do vento[%]
T0	21,51974518	17,93082182
T6	31,20175957	22,64172018
T9	17,11489742	13,2904291
T20	18,89741914	x
T21	20,59035384	8,999989596
T22	13,68166603	8,345116152
T23	30,37754715	26,83611535
WMM 101m	x	19,34515128
13,94394439		10,6717585
Erro Médio Total na velocidade do vento [%]		

Figura 30 – Erro médio local e total dos resultados simulados computacionalmente para os parâmetros velocidade e direção de vento, na introdução das condições fronteira iniciais na posição do mastro WMM e da turbina T20, em relação aos resultados medidos experimentalmente, para o parâmetro velocidade do vento.

Local	Condições Fronteira iniciais em WMM	Condições Fronteira iniciais em T20
	Desvio médio direção do vento[°]	Desvio médio direção do vento[°]
T0	13,97105986	15,122043
T6	25,26025066	36,43841721
T9	9,005308108	11,0181846
T20	7,631861431	x
T21	8,680866603	12,4501159
T22	18,88219796	22,4883444
T23	13,04646441	8,700611123
WMM 101m	x	15,25559935
8,770728093		11,04302869
Erro Médio Total na direção do vento [°]		

Figura 31 – Erro médio local e total dos resultados simulados computacionalmente para os parâmetros velocidade e direção de vento, na introdução das condições fronteira iniciais na posição do mastro WMM e da turbina T20, em relação aos resultados medidos experimentalmente, para o parâmetro direção do vento.

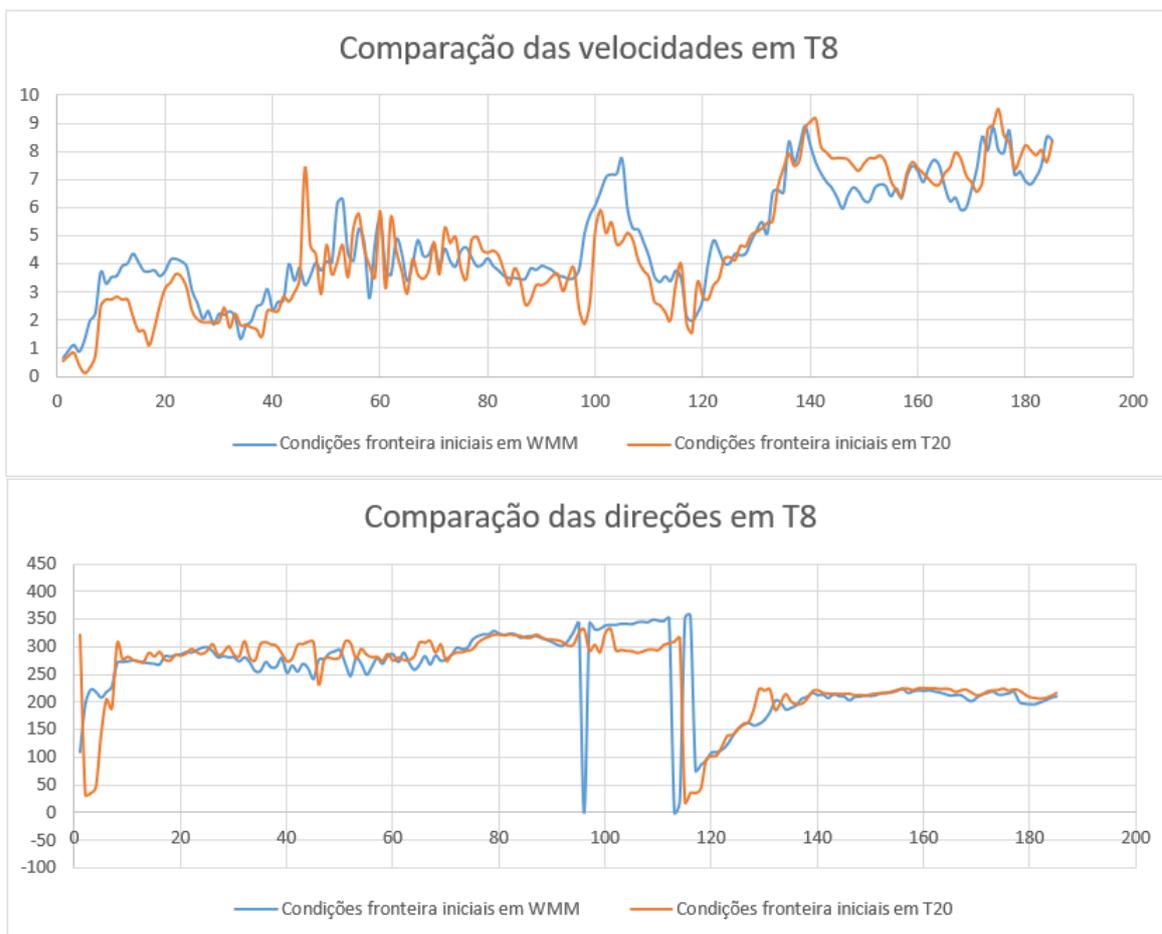


Figura 32 – Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional para os parâmetros velocidade e direção do vento, variando a posição de introdução das condições fronteira iniciais entre o mastro de medição WMM e a turbina T20.

Antes de se fazerem quaisquer conclusões, é de importância significativa explicar os picos negativos nos gráficos relativos às direções de vento.

A direção do vento oscila entre 0° e 360°, coincidindo o início/fim destes valores na coordenada Norte. Os resultados obtidos para a direção do vento foram apresentados num gráfico de dispersão de linhas que não permite que exista a melhor clareza na exposição destes valores.

Sempre que existe uma oscilação perto do Norte e se passa de valores de 3 dígitos para 1 dígito (exemplo: oscilação na direção de vento de 359° para 1°), num gráfico de distribuição de linhas é representado como um pico negativo onde a variação ronda os 360°. Por isto, onde existem picos negativos, os resultados aparentam estar bastante desviados quando na realidade poderão estar muito próximos uns dos outros, havendo assim a

necessidade de analisar os resultados com atenção e compreender que se está a falar de um ciclo contínuo de 360° (onde de 359° para 1°, apenas existe a variação de 2°).

Posto isto, passa-se agora à enumeração das conclusões que se retiraram da análise dos resultados obtidos. Primeiro serão enumeradas as conclusões quanto ao tema secundário (influência posição de introdução das condições fronteira iniciais nos resultados obtidos), seguindo-se da conclusão principal e final deste caso:

- **Existência de influência da posição de introdução das condições fronteira iniciais nos resultados obtidos.** É possível notar, de forma clara, que existe uma variação nos resultados simulados após imposição de diferentes posições de entrada para as condições fronteira iniciais. Nas figuras 30 e 31, pode-se ver precisamente isto.

Noutra perspetiva, a partir das tabelas dos erros médios, fazer a afirmação de que quanto mais perto do local de origem das condições iniciais menor será o erro e portanto mais fiáveis serão os resultados, para o panorama geral é inválido (apenas é válido para os valores no mastro WMM, que se encontram extremamente perto de uma das condições fronteira iniciais), visto que o valor do erro médio local nas posições de proximidade das duas condições de fronteira iniciais utilizadas varia de forma aparentemente aleatória. É então viável dizer que a posição inicial de introdução das condições fronteira influencia os resultados finais da simulação.

- **Independência do erro médio total, da posição de introdução das condições fronteira iniciais nos resultados obtidos.** A partir da amostra estudada, o erro médio total não apresenta uma variação significativa nos parâmetros estudados para que se possa dizer que a alteração da posição de introdução das condições fronteira iniciais afetam a fiabilidade geral da simulação. Então com base nesta e na conclusão, apenas é afetado o erro médio local e de forma aparentemente aleatória.
- **O desfasamento nos resultados afeta o erro de forma negativa.** Como já referido anteriormente, existe um desfasamento entre os resultados experimentais e os simulados, que pode ser explicado pela utilização do regime estacionário nas simulações. Devido a este desfasamento, os valores do erro médio são mais altos, fazendo parecer a simulação menos fiável do que na realidade é.

Por fim, é tempo de olhar para os resultados das simulações de forma geral e validar o caso. Para isto apresentam-se os erros médios totais das simulações em relação aos dados experimentais na figura 33.

Erro Médio Total das simulações na velocidade do vento [%]	12,307851
Erro Médio Total das simulações na direção do vento [°]	9,9068784

Figura 33 - Erro médio total das simulações computacionais nos parâmetros velocidade e direção de vento, em relação aos dados medidos experimentalmente.

A partir de todos os dados recolhidos e apresentados, é possível afirmar que os resultados obtidos pelo WindStation se aproximam bastante dos resultados reais. As curvas obtidas pelo WindStation coincidem bastante com as curvas dos resultados reais e é neste facto que se baseia principalmente a conclusão retirada.

Mostram-se também de importância extrema, os valores do erro médio total obtido para os resultados simulados em relação aos reais, que se encontram um pouco mais elevados do que esperado, mas num patamar aceitável. Estes valores tenderão a diminuir assim que se resolver o problema do desfasamento nos resultados, apoiando assim esta conclusão.

4. CONCLUSÕES DA DISSERTAÇÃO

Ao longo desta dissertação foi reforçada a ideia de que a previsão computacional de parâmetros atmosféricos é cada vez mais importante nos dias que correm, esta permite poupar recursos e tempo na realização de estudos de topografias, sendo por isto fundamental o desenvolvimento e aperfeiçoamento de softwares como o WindStation.

No decorrer do presente trabalho, para que os resultados fossem os melhores possíveis dentro do tempo disponível, foram realizadas atualizações ao software que corrigiram aperfeiçoaram parâmetros deste, permitindo maior fiabilidade nos resultados.

A utilização do software nesta dissertação em ambos os casos (Bolund e Parque Eólico), revelou que para o estudo de topografias, a realização de estudos de malha como primeiro passo é fundamental na obtenção de resultados fiáveis, na medida em que sem este, a probabilidade de utilização de um tamanho de malha errado é significativa.

O estudo do caso de Bolund revelou que para topografias de pequenas dimensões, não existe variação significativa na escolha de diferentes modelos de turbulência e esquemas de advecção, sendo por isto necessário que se faça o mesmo estudo para domínios maiores a fim de se verificar e confirmar as diferenças entre eles. Revelou ainda a dificuldade do modelo computacional em obter resultados precisos em locais de topografias complexas (como por exemplo no ponto M7) e a presença de um erro no cálculo da energia cinética de turbulência (TKE) no modelo de turbulência Standard $k - \epsilon$, revelando assim a necessidade de estudo e desenvolvimento do software.

No estudo do caso Parque Eólico situado no norte de França, a dependência dos resultados locais (e por isso o erro médio local em comparação com os resultados reais) com a localização do ponto de introdução das condições fronteira iniciais foi provada, algo que não afeta o erro médio total do parâmetro que se pretende estudar. Ao longo deste estudo descobriu-se ainda a existência de um desfasamento temporal entre os resultados simulados e os dados reais, que muito provavelmente estará na origem da dimensão do erro médio total da simulação, que se apresenta um pouco mais elevado do que esperado.

Em suma, o software WindStation apresenta-se como sendo um software com um potencial bastante elevado, visto que já apresenta resultados com um nível de precisão bastante elevado e que poderia ser utilizado com sucesso num caso exemplo como, o estudo de um domínio topográfico para a colocação de turbinas eólicas, nas regiões de maior

intensidade de vento. Por outro lado, existe a necessidade de desenvolvimento do software para a correção de alguns erros (como o erro da energia cinética de turbulência TKE), a resolução do problema do desfasamento temporal e a obtenção de resultados precisos em torno de topografias complexas que continua a ser um desafio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bechmann, A., “The Bolund Experiment: A Validation Dataset”.
- Bechmann, A., Berg, J., Courtney, M.S., Hans E. Jørgensen, Jakob Mann and Niels N. Sørensen, “The Bolund Experiment: Overview and Background”, Risoe-R; No. 1623(EN), 2009.
- Bechmann, A., Sørensen, N.N., Berg, J., Mann, J., Réthoré, P.E., “The Bolund Experiment, Part II: Blind Comparison of Microscale Flow Models”, Boundary-Layer Meteorol, 141: 245, 2011.
- Bechmann, A.; Johansen, J.; Sørensen, N.N., “The Bolund experiment - design of measurement campaign using CFD”, Roskilde: Risø National Laboratory. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R; No. 1623(EN), 2007.
- Vicente, A.N., “Validation of wind turbine wake models” Tese de Mestrado do curso de Mestrado integrado em Engenharia Mecânica da FCTUC, 2018.
- Djilali, N., Gartshore, I. and Salcudean, M., “Calculation of Convective Heat Transfer in Recirculating Turbulent Flows Using Various Near-Wall Turbulence Models”, Numerical Heat Transfer, Part A, 16, 189-212, 1989.
- https://pt.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A2nica_dos_fluidos, acessado em 18/07/2018
- https://pt.wikipedia.org/wiki/Regime_de_escoamento, acessado em 18/07/2018
- <https://www.infoescola.com/mecanica-de-fluidos/tipos-de-fluxos-e-escoamentos/>, acessado em 18/07/2018
- [https://www.infopedia.pt/\\$forca-de-coriolis](https://www.infopedia.pt/$forca-de-coriolis), acessado em 20/07/2018
- Berg, J., Mann, J., Bechmann, A., Courtney, M.S., Jørgensen, H.E., “The Bolund Experiment, Part I: Flow Over a Steep, Three-Dimensional Hill”, Boundary-Layer Meteorology, 141: 219, 2011.
- Launder, B.E. and Spalding D.B., “The Numerical Computation of Turbulent Flows”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269-289, 1974.
- Launder, B.E. and Spalding, D.B. “Mathematical Models of Turbulence”, Academic Press London and New York, ISBN 0-12-438050-6, 1972.
- Lopes, A.M.G., Sousa, A.C.M. and Viegas, D.X., “Numerical Simulation of Turbulent Flow and Fire Propagation in Complex Terrain”, Numerical Heat Transfer, Part A, 27, 229-253, 1995.
- Lopes, WindStation User’s Manual, 2018.

- Sørensen, N.N., “RANS CFD simulations of flow around Bolund”, Roskilde: Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi, Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R; No. 1745(EN), 2010.
- Oliveira, L. A. & Lopes, A.G., “Mecânica dos Fluidos” (3ª Ed), Lidel, 2010.
- Pedro J.F.S., “Previsão numérica do vento em torno de topografia complexa – dependência de parâmetros de simulação e comparação com resultados experimentais” Tese de Mestrado do curso de Mestrado integrado em Engenharia Mecânica da FCTUC, 2015.
- Uchida, T, “Validation Testing of the Prediction Accuracy of the Numerical Wind Synopsis Prediction Technique RIAM-COMPACT® for the Case of the Bolund Experiment - Comparison against a Wind-Tunnel Experiment, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University No.147 (7 –14), September 2014.

APÊNDICE A

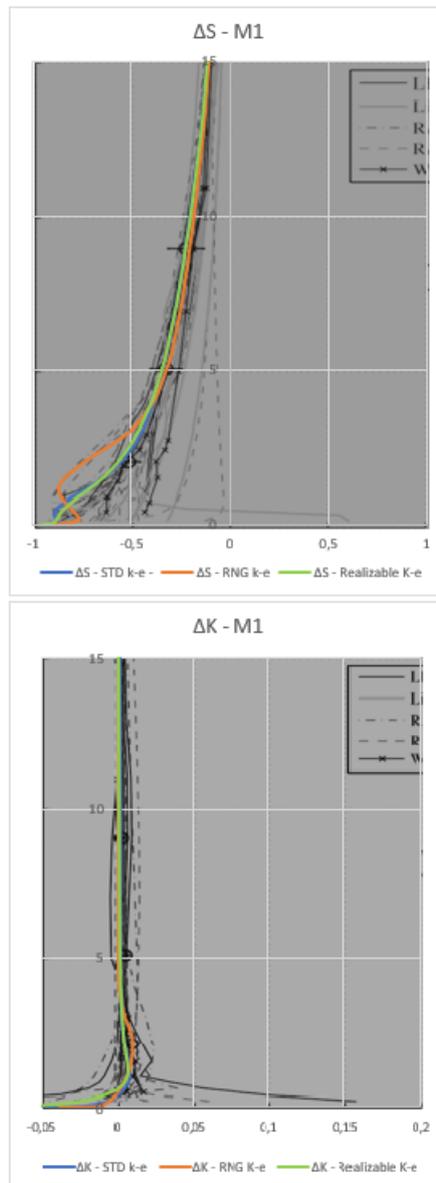


Figura 34 - Resultados Verticais no ponto M1, para diferentes modelos de turbulência: a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).

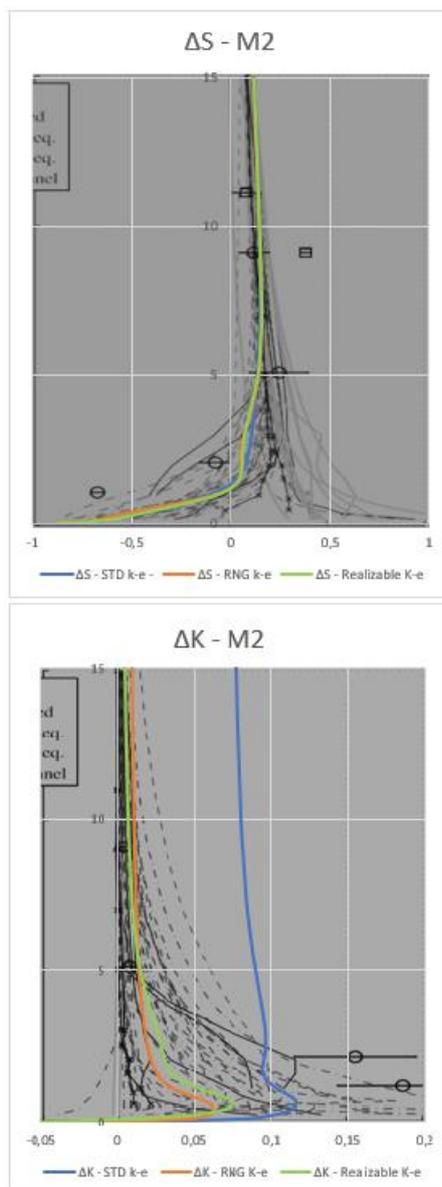


Figura 35 - Resultados Verticais no ponto M2, para diferentes modelos de turbulência: a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).

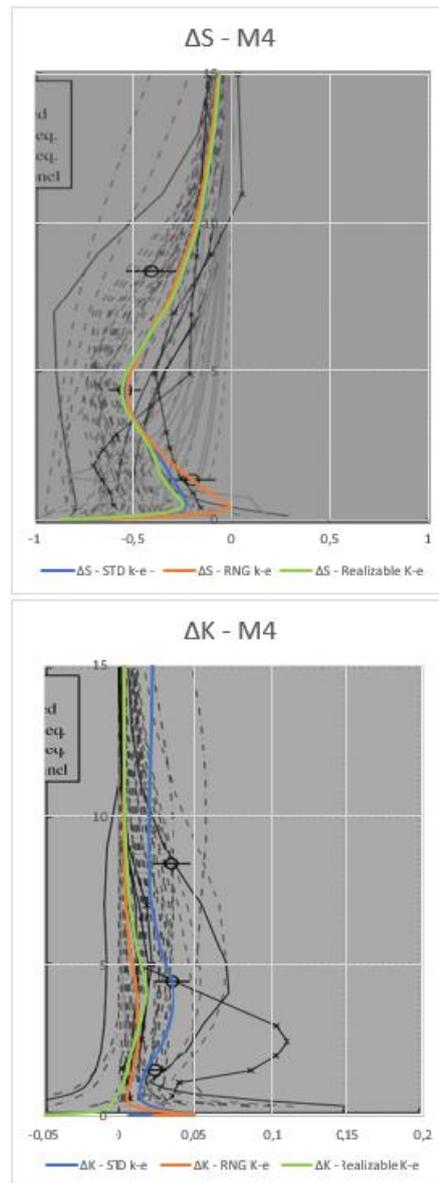


Figura 36 - Resultados Verticais no ponto M4, para diferentes modelos de turbulência: a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).

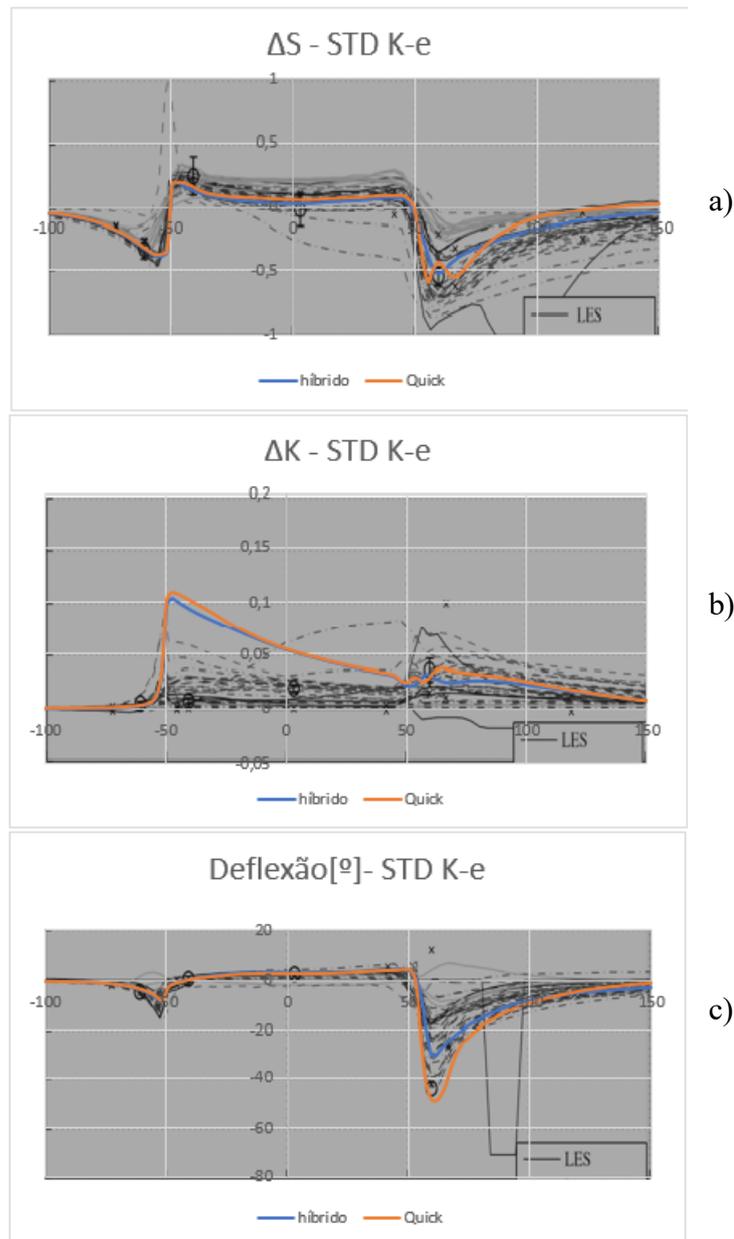


Figura 37 - Resultados ao longo da linha A 239° para diferentes esquemas de advecção utilizando o modelo de turbulência Standard k - ϵ : a) ΔS ; b) Δk ; c) deflexão tomando a direção em M0 como referência; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).

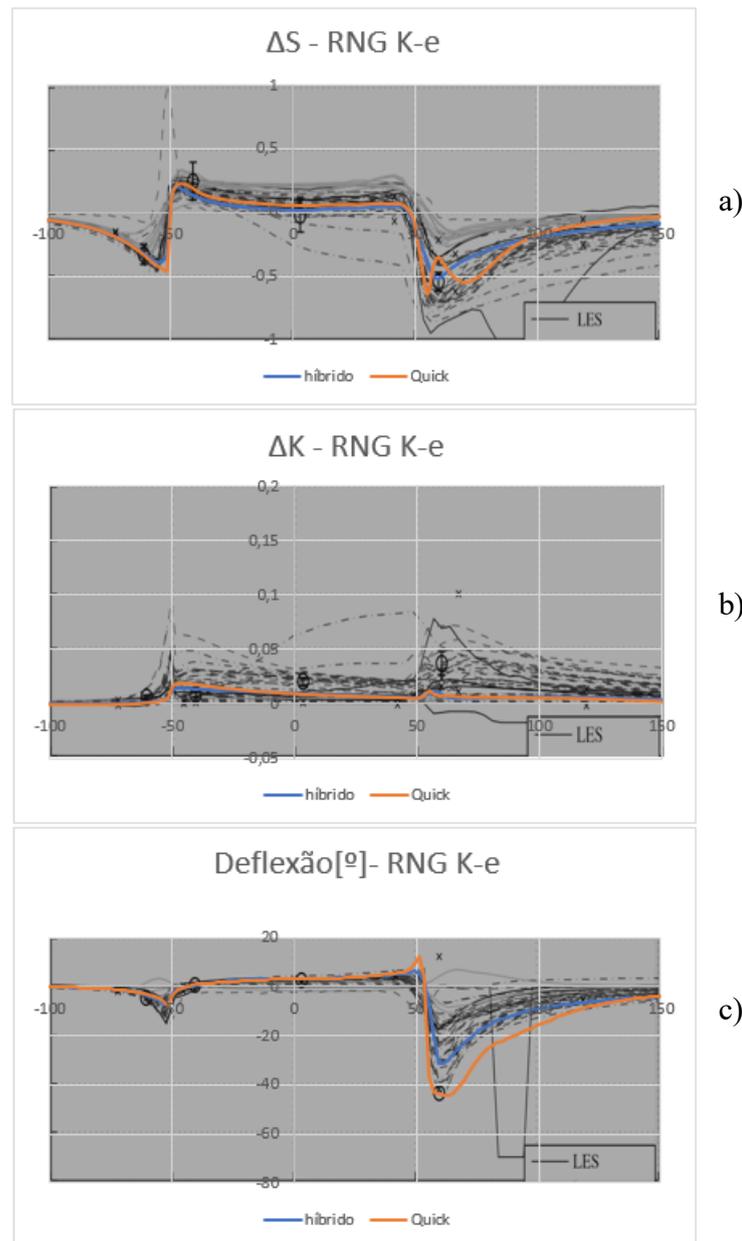


Figura 38- Resultados ao longo da linha A 239° para diferentes esquemas de advecção utilizando o modelo de turbulência RNG k - ϵ : a) ΔS ; b) Δk ; c) deflexão tomando a direção em M0 como referência; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).

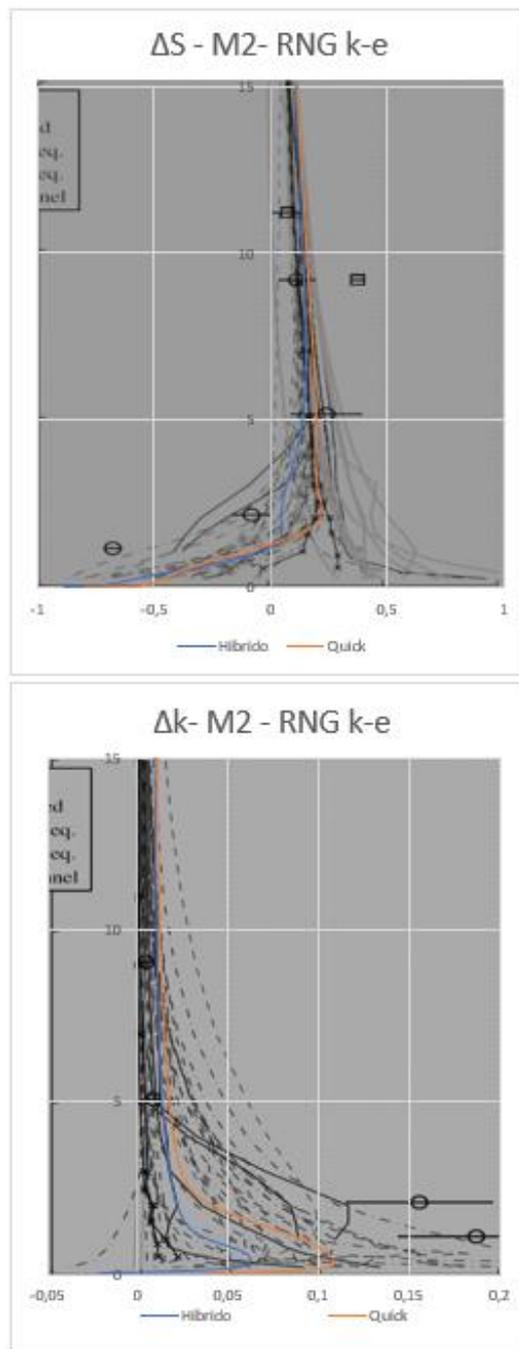


Figura 39 - Resultados Verticais no ponto M2, para diferentes esquemas de advecção, para o modelo de turbulência RNG k - ϵ : a) ΔS ; b) Δk ; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).

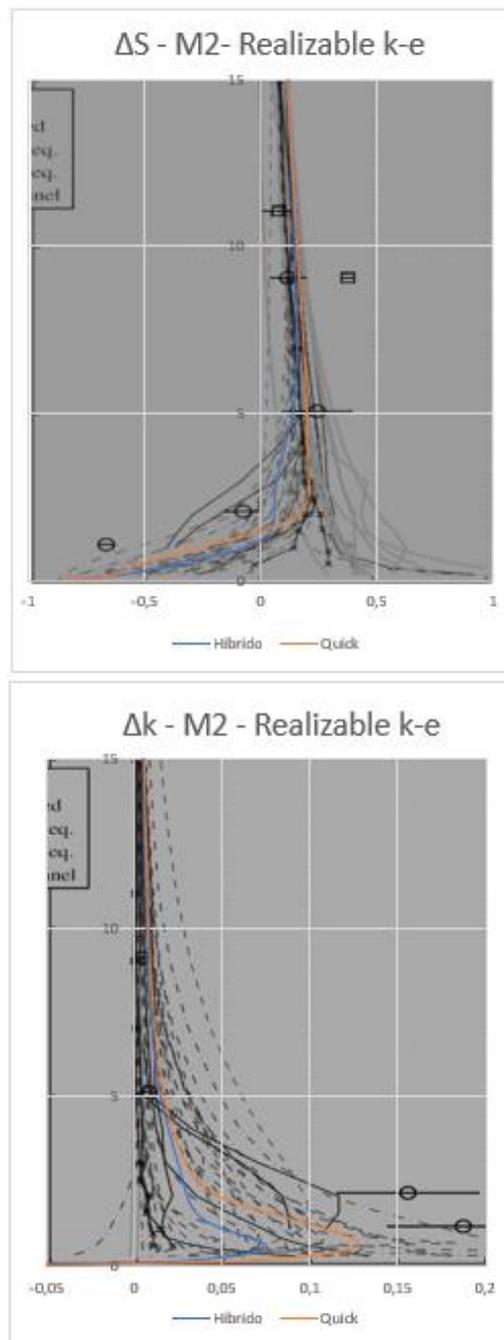


Figura 40 - Resultados Verticais no ponto M2, para diferentes esquemas de advecção, para o modelo de turbulência Realizable k - ε: a) ΔS; b) Δk; juntamente com a sobreposição dos gráficos obtidos no estudo de Bechmann et al. (2011).

APÊNDICE B

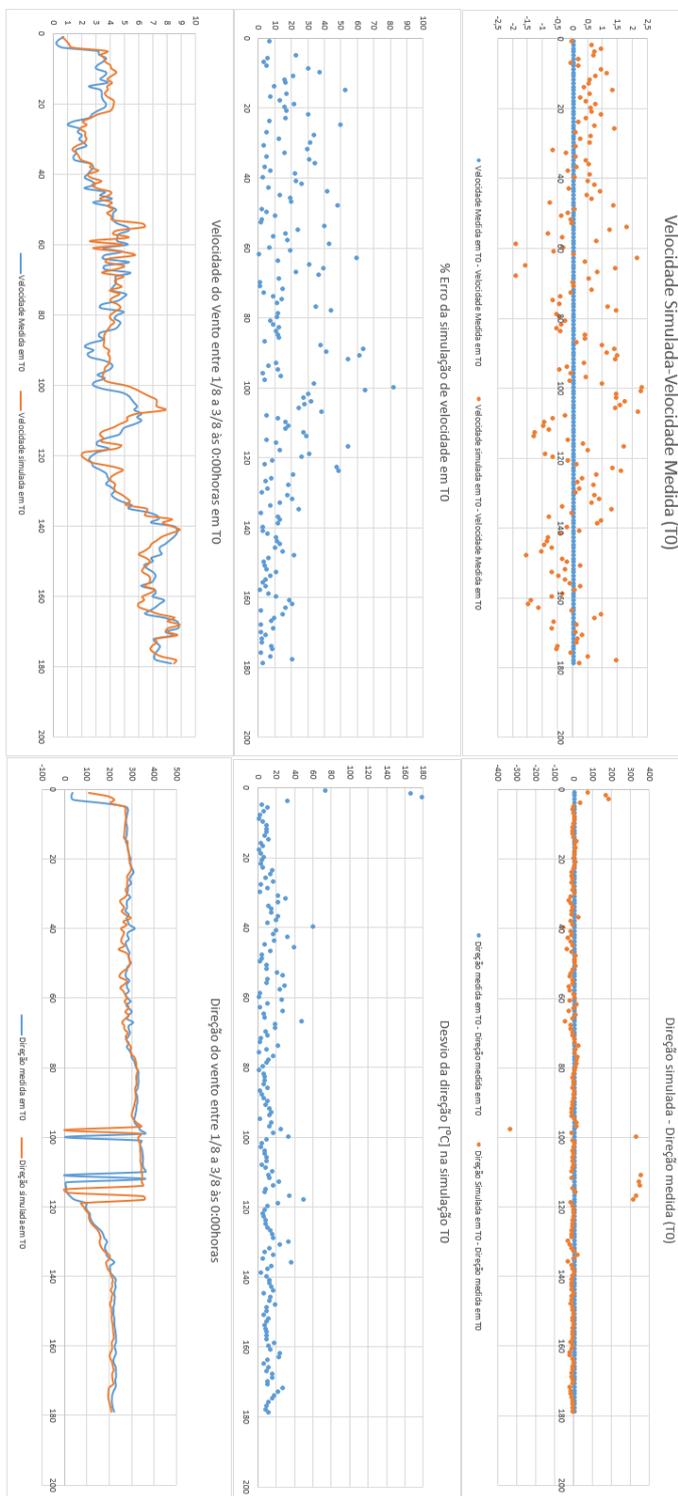


Figura 41 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T0, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.

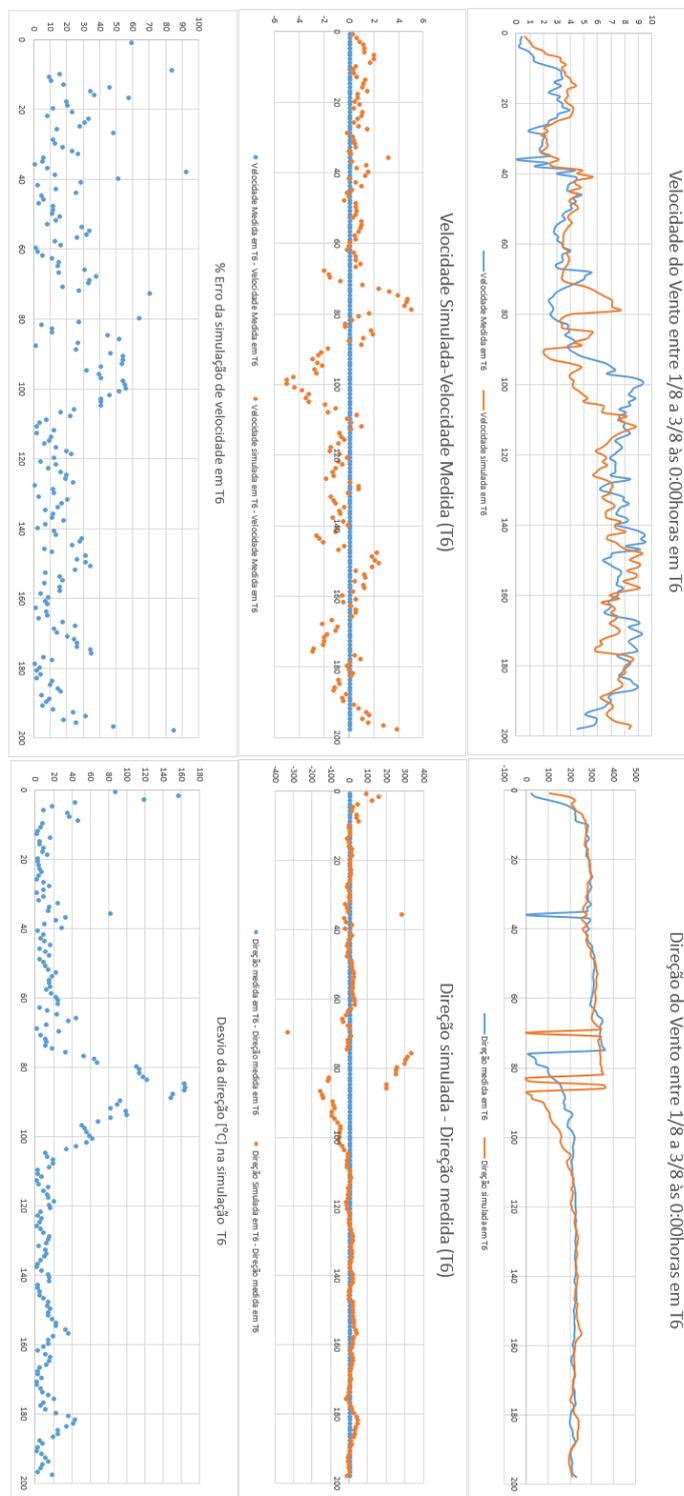


Figura 42 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T6, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.

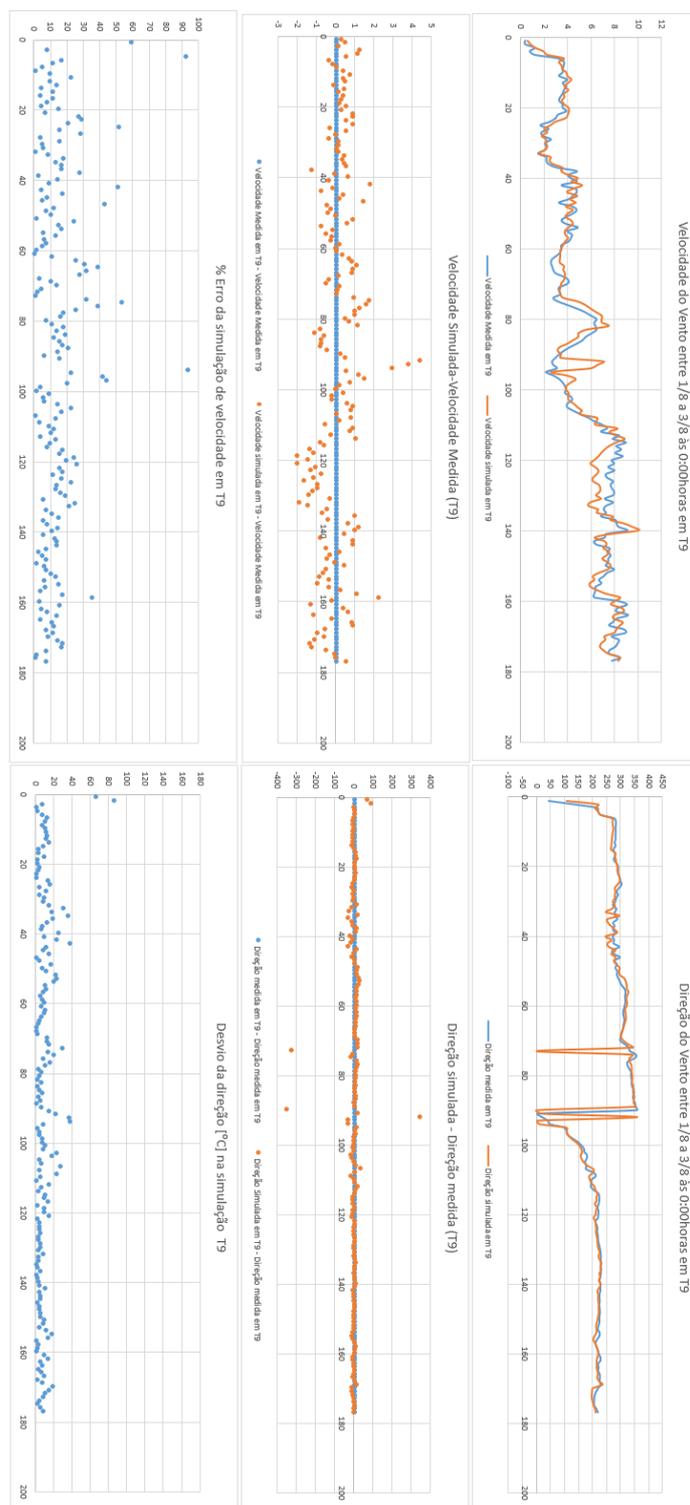


Figura 43 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T9, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.

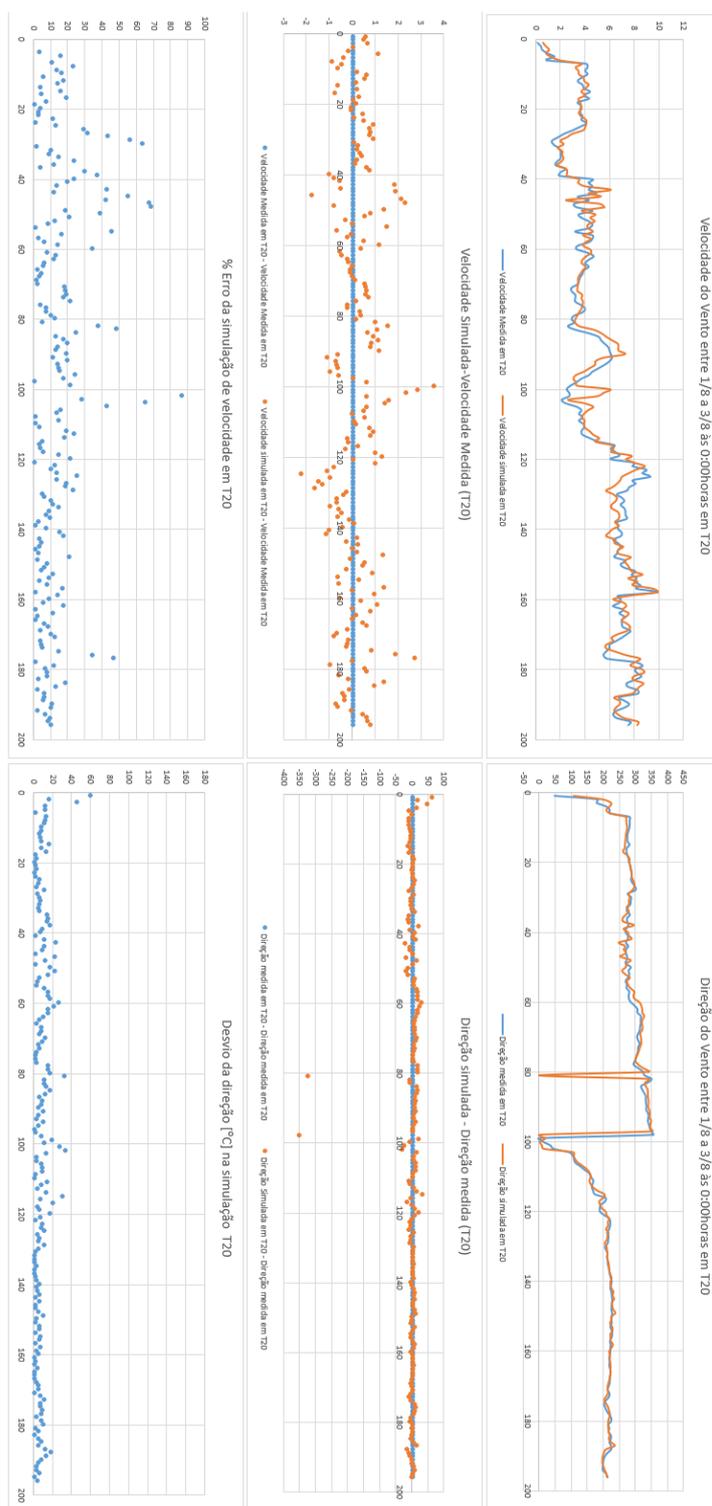


Figura 44 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T20, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.

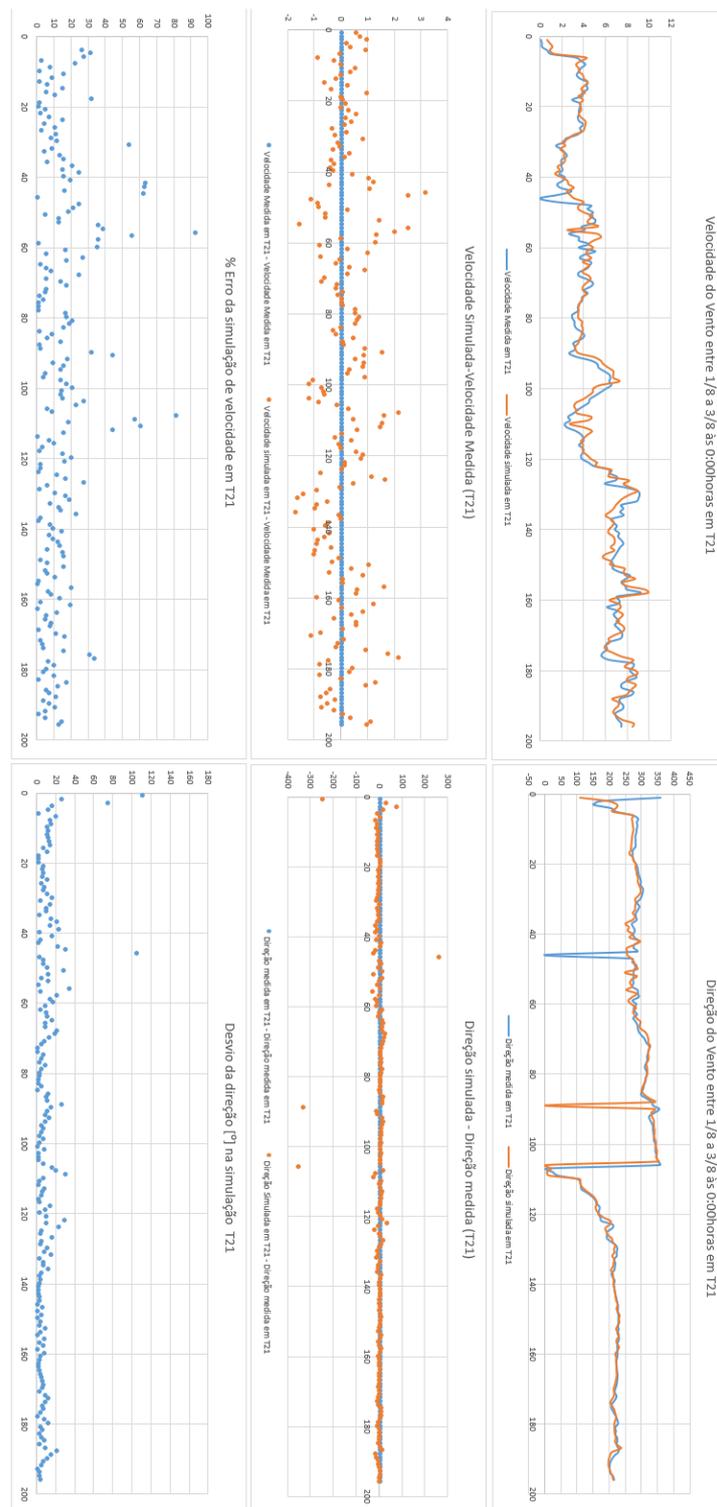


Figura 45 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T21, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.

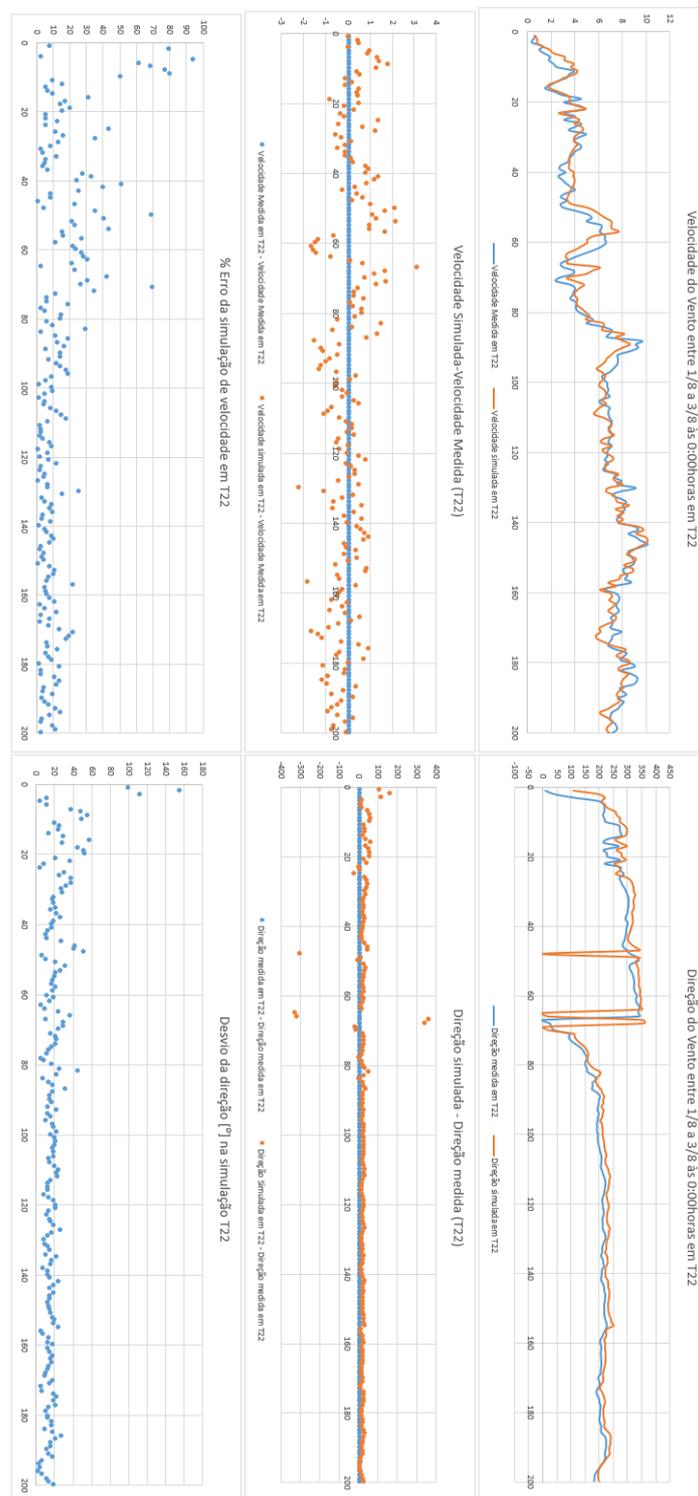


Figura 46 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T22, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.

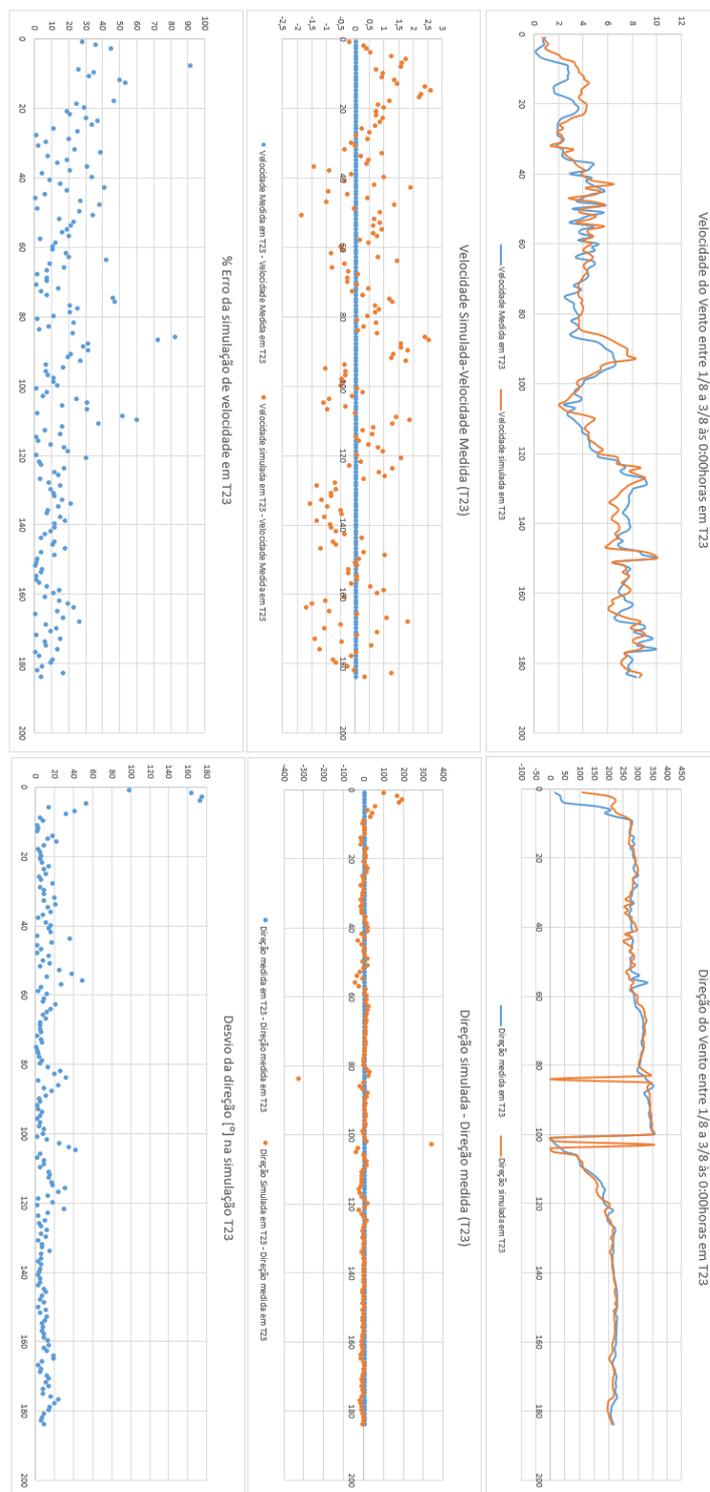


Figura 47 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T23, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.

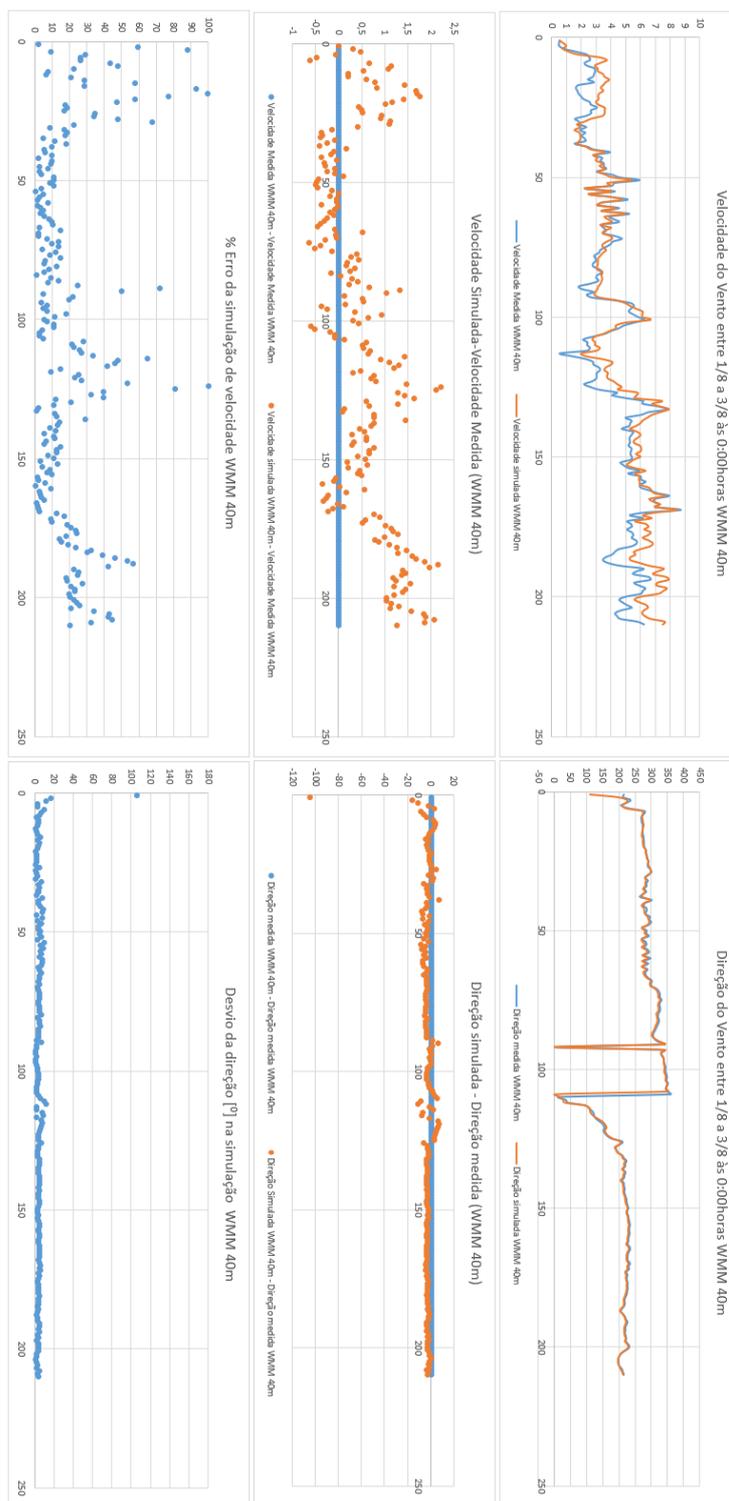


Figura 48 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro WMM a 40m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.



Figura 49 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro WMM a 60m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.

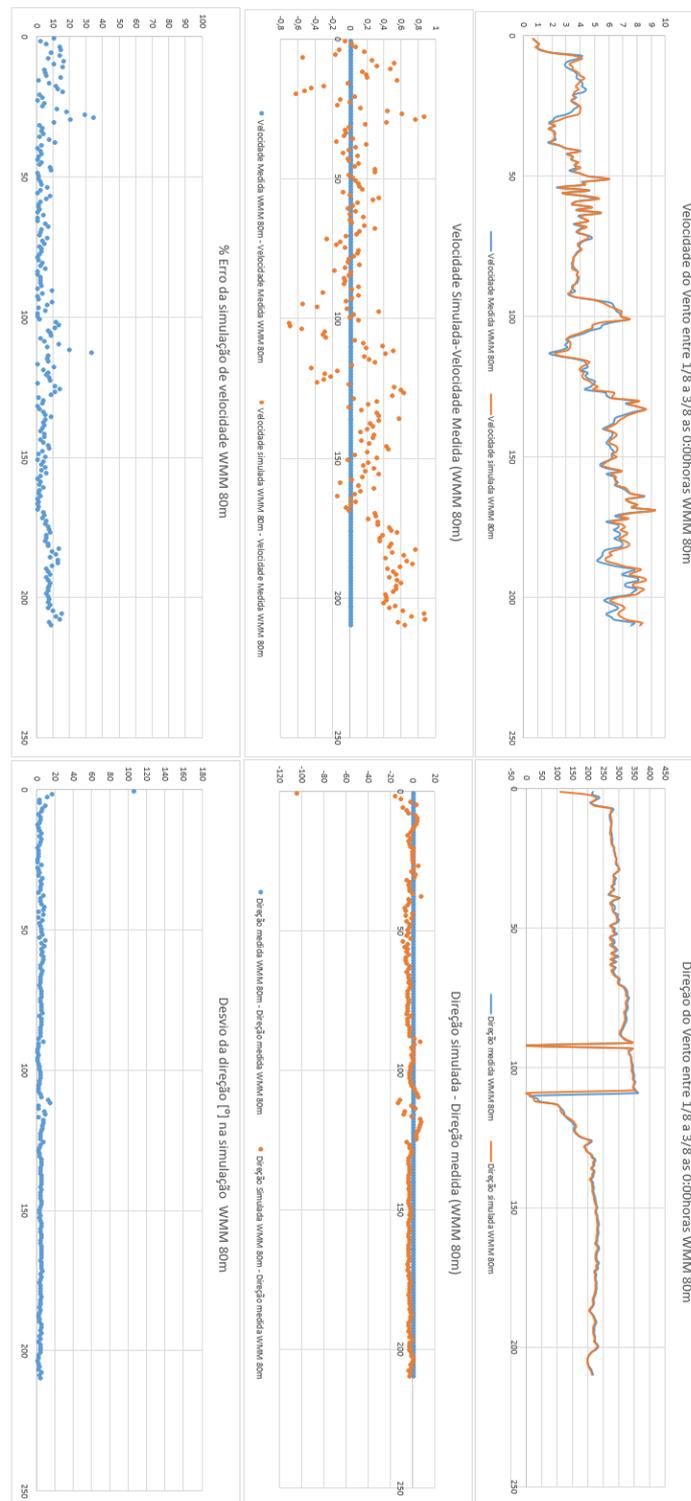


Figura 50 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro WMM a 80m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.

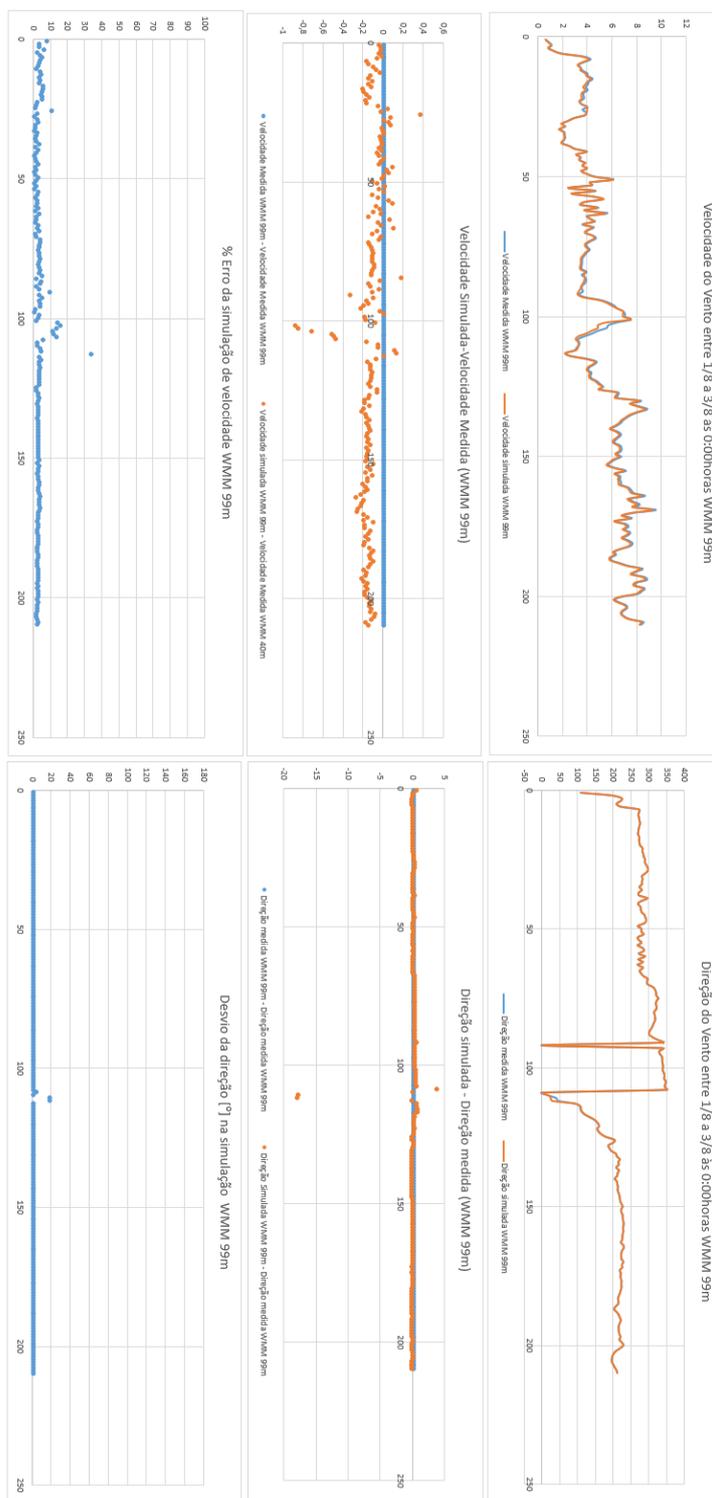


Figura 51 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro WMM a 99m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do mastro de leitura WMM a 101m.

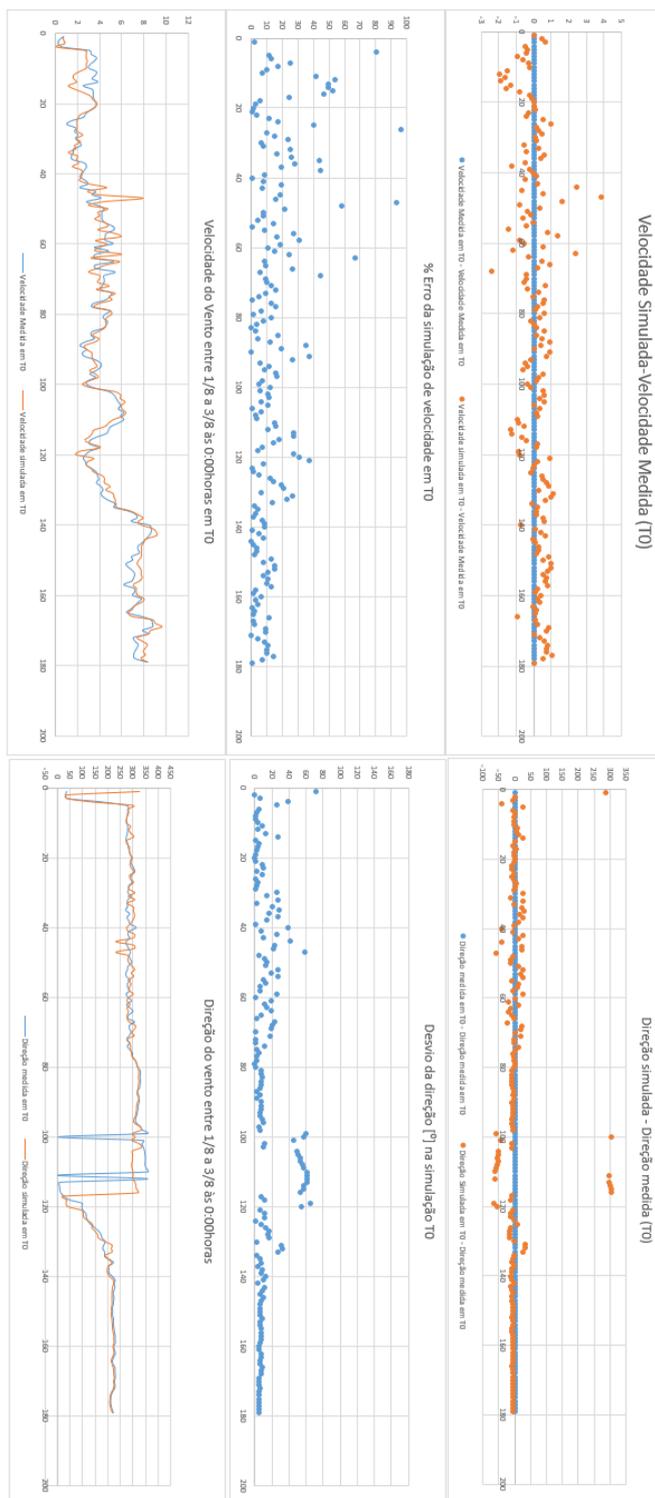


Figura 52 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T0, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.

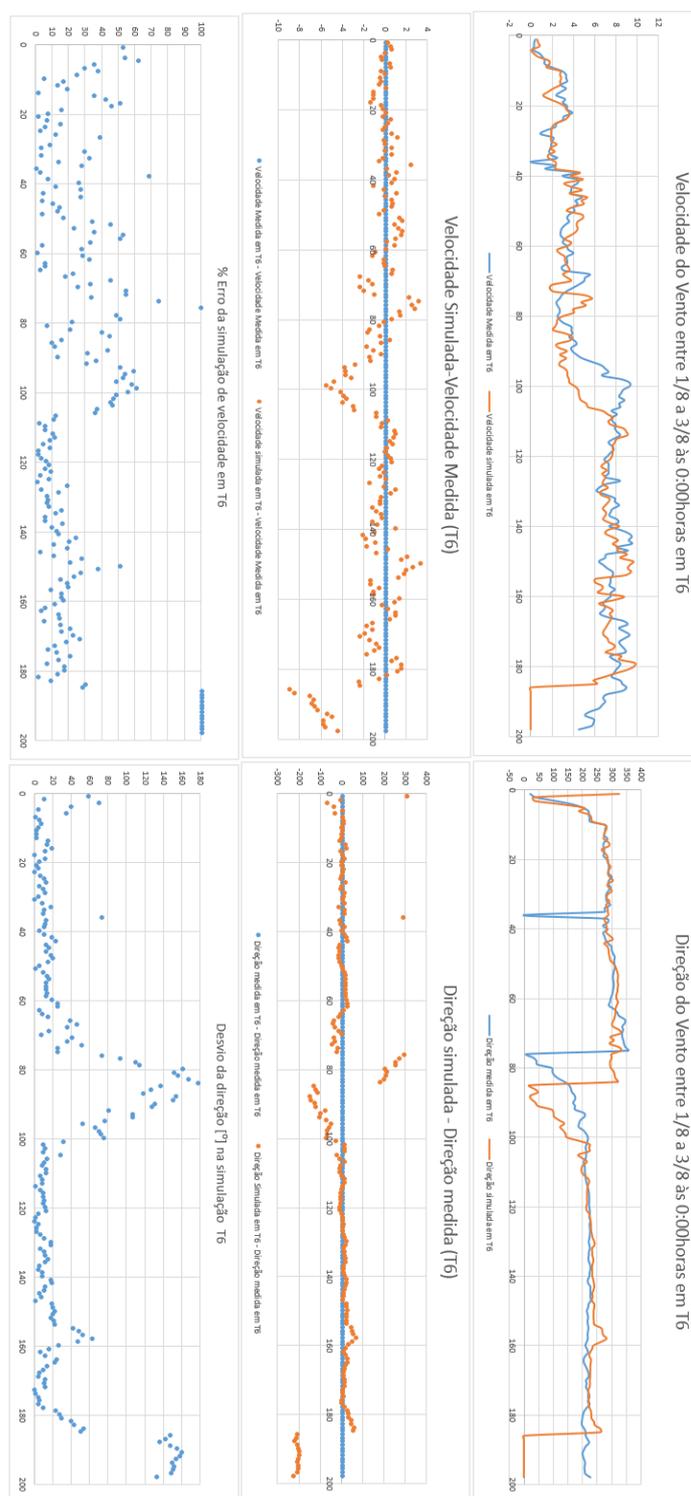


Figura 53 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T6, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.

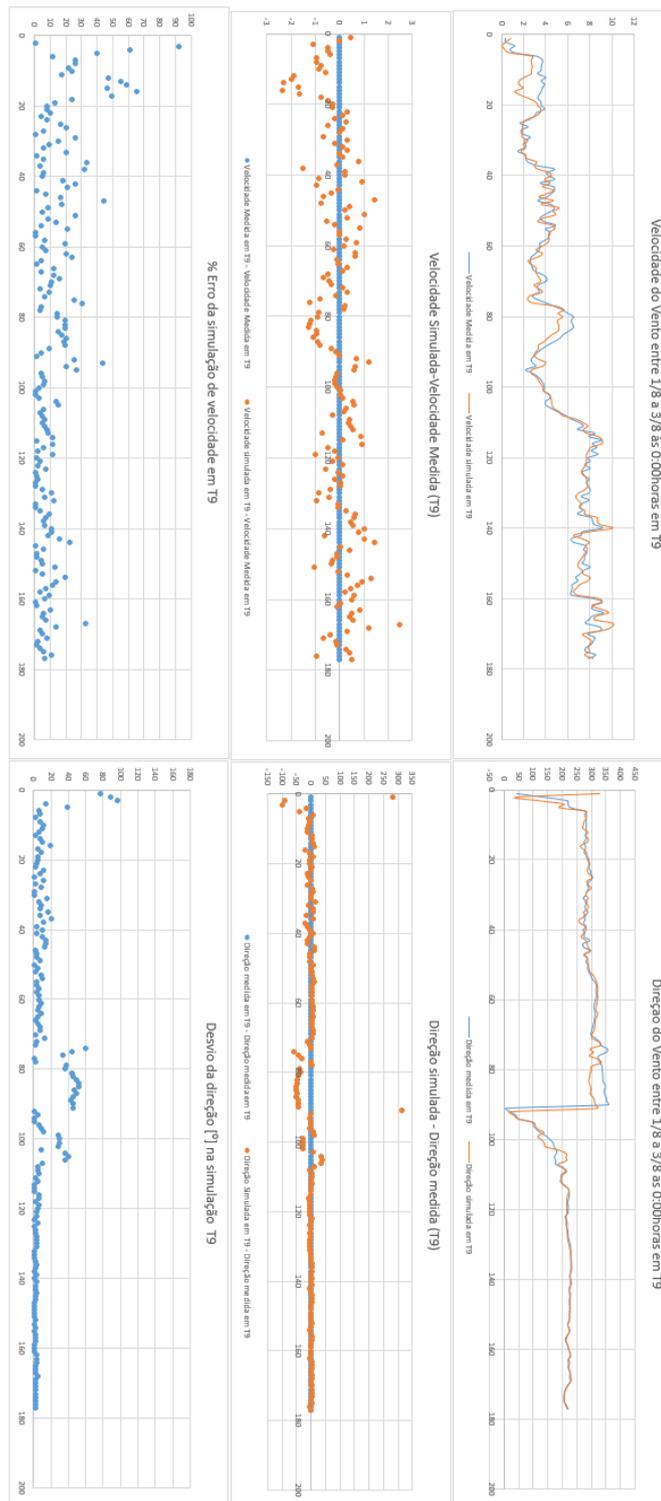


Figura 54 Figura 55 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T9, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.

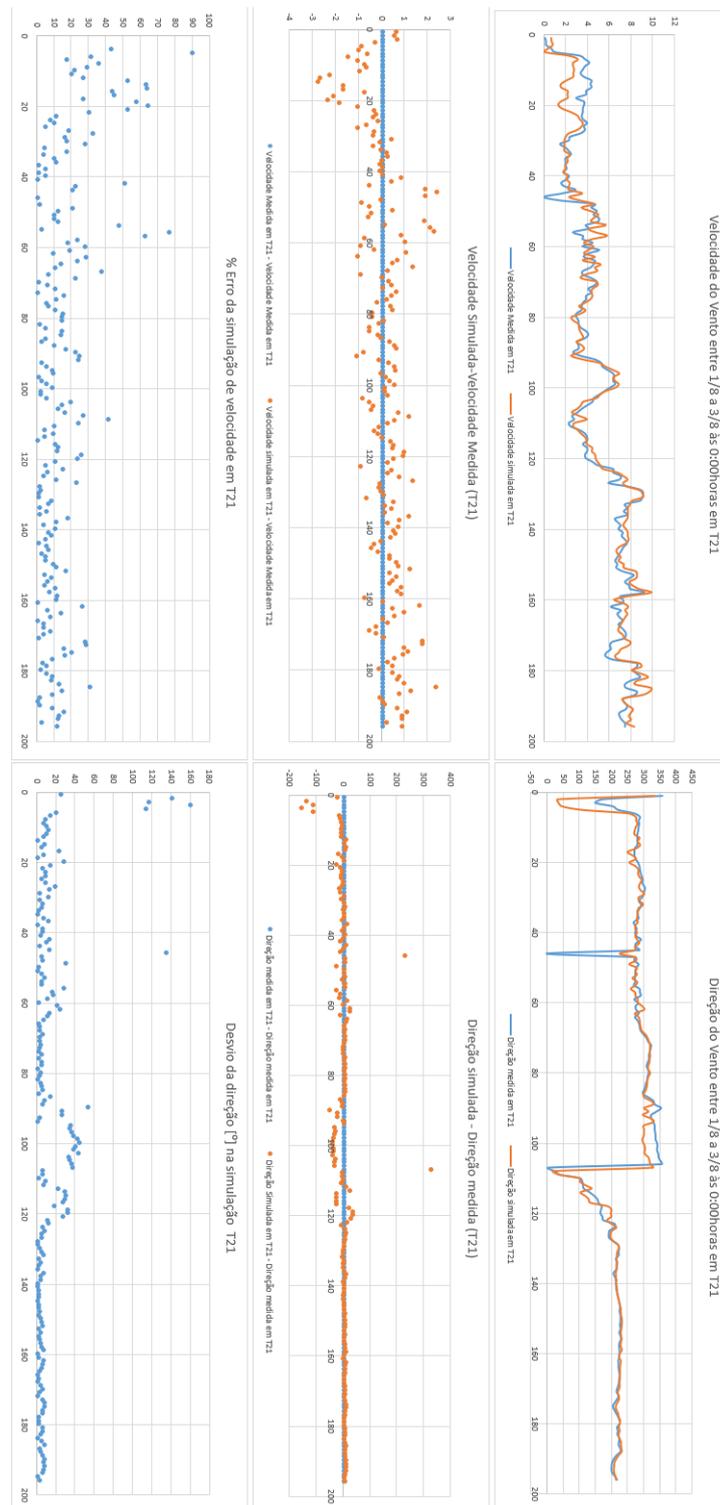


Figura 56 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T21, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.

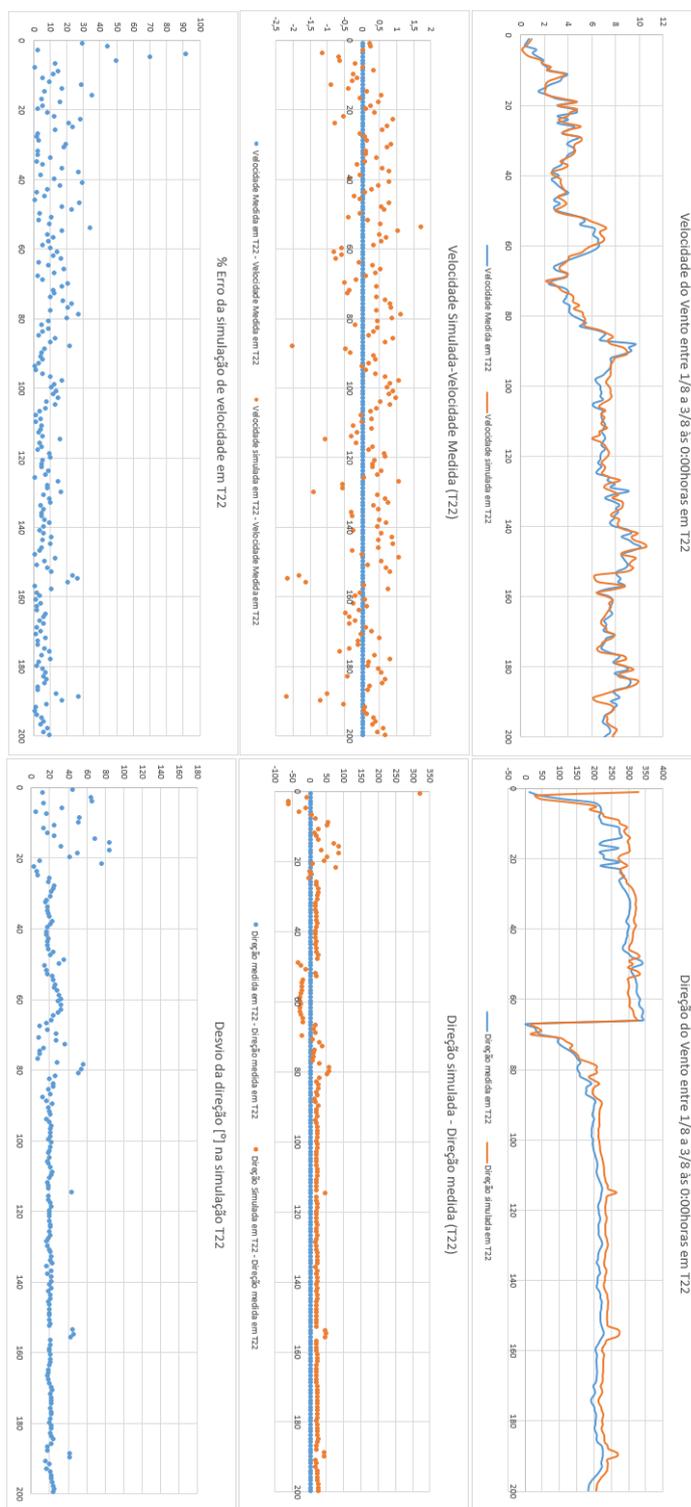


Figura 57 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T22, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.

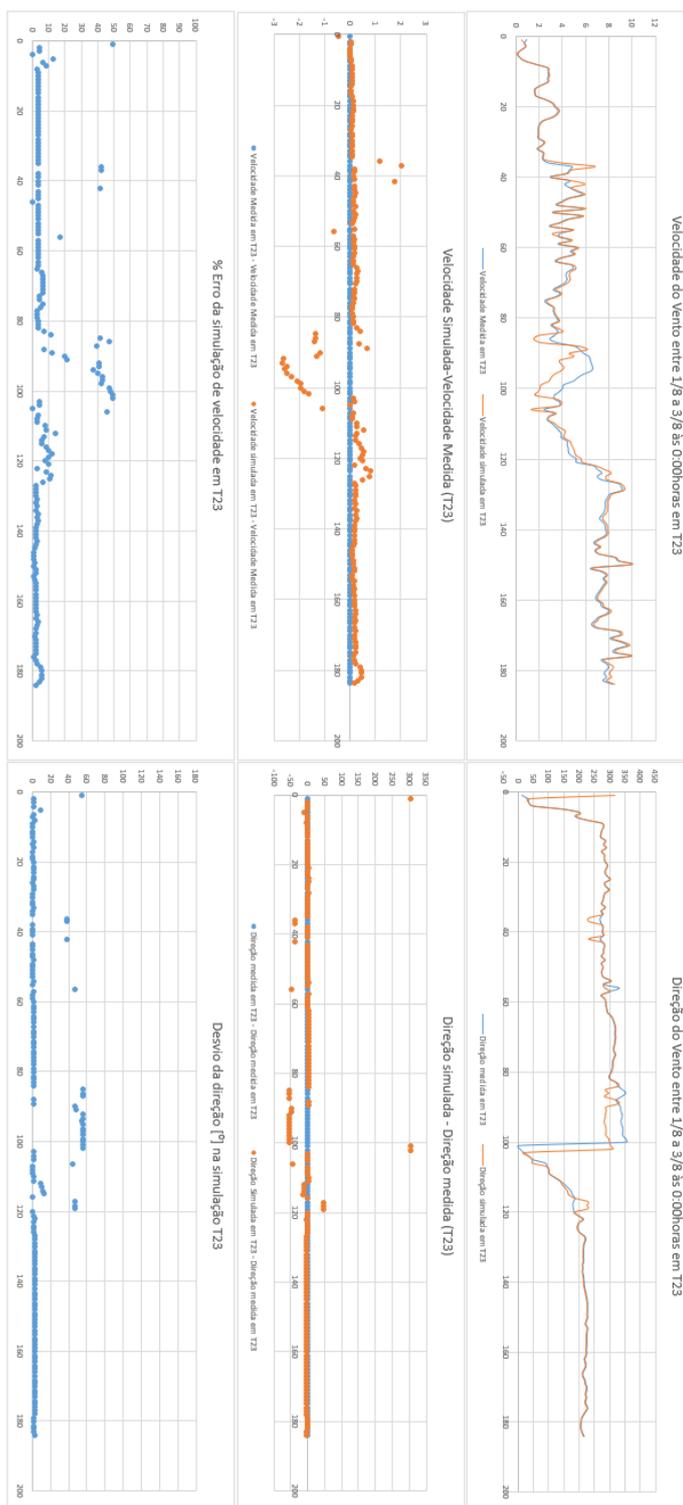


Figura 58 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente na turbina T23, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.

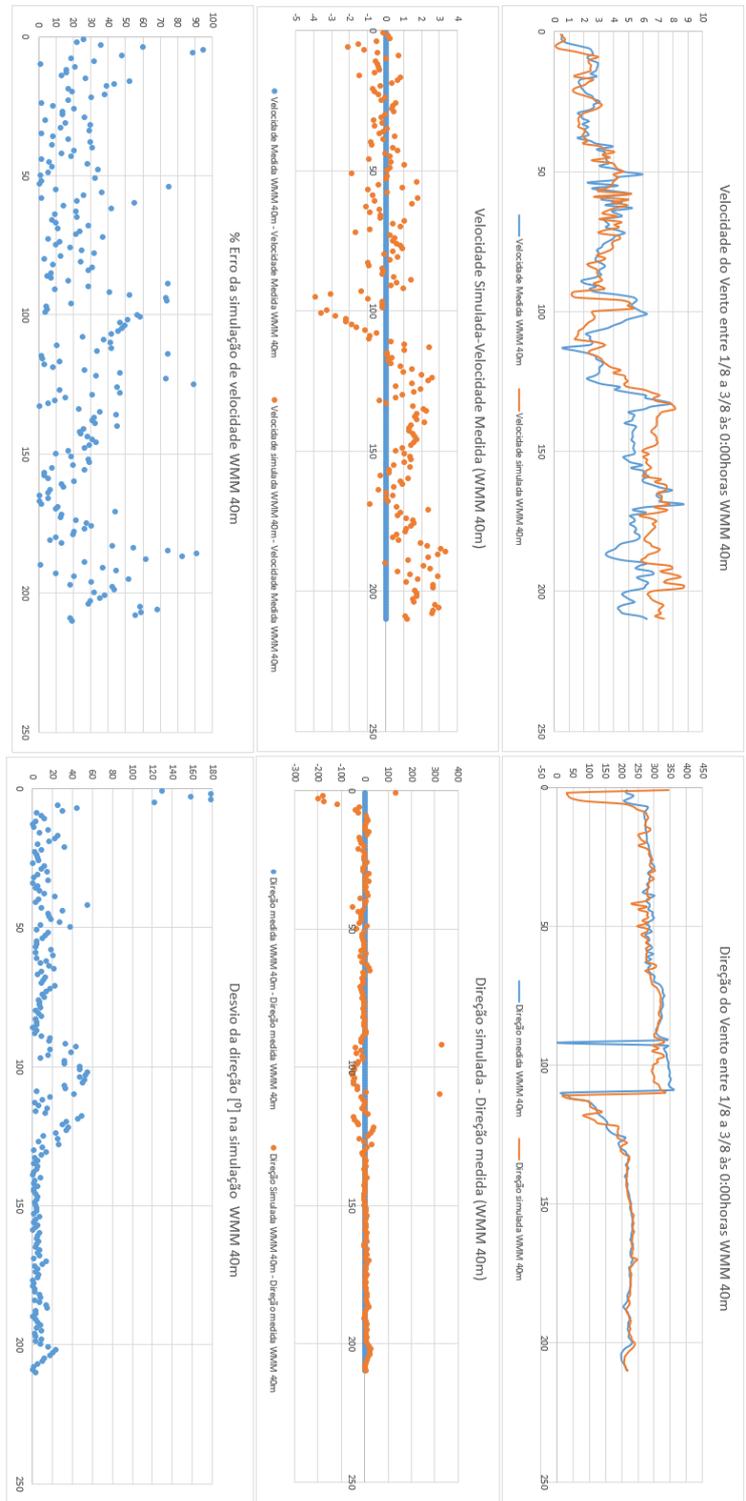


Figura 59 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro de medição WMM a 40m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteiriça iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.

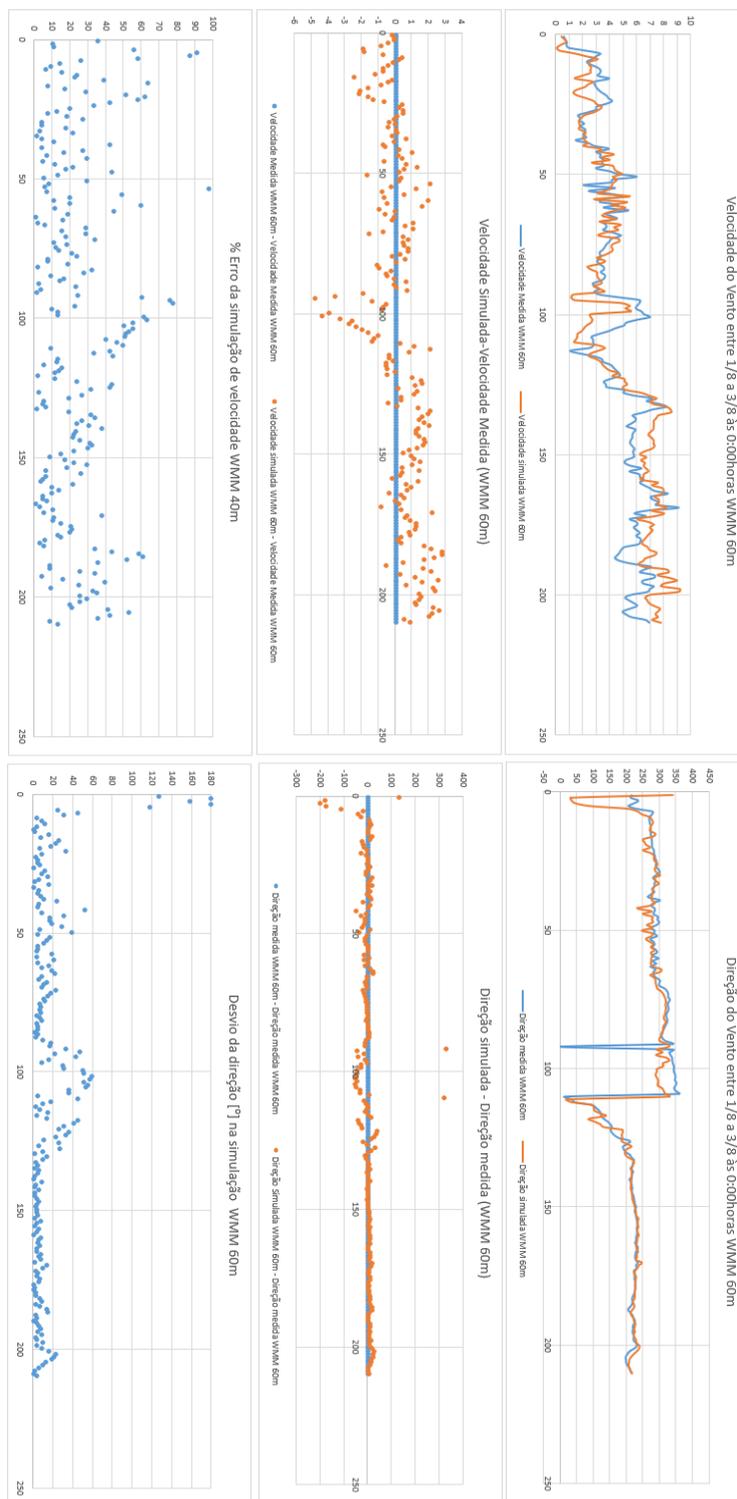


Figura 60 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro de medição WMM a 60m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.

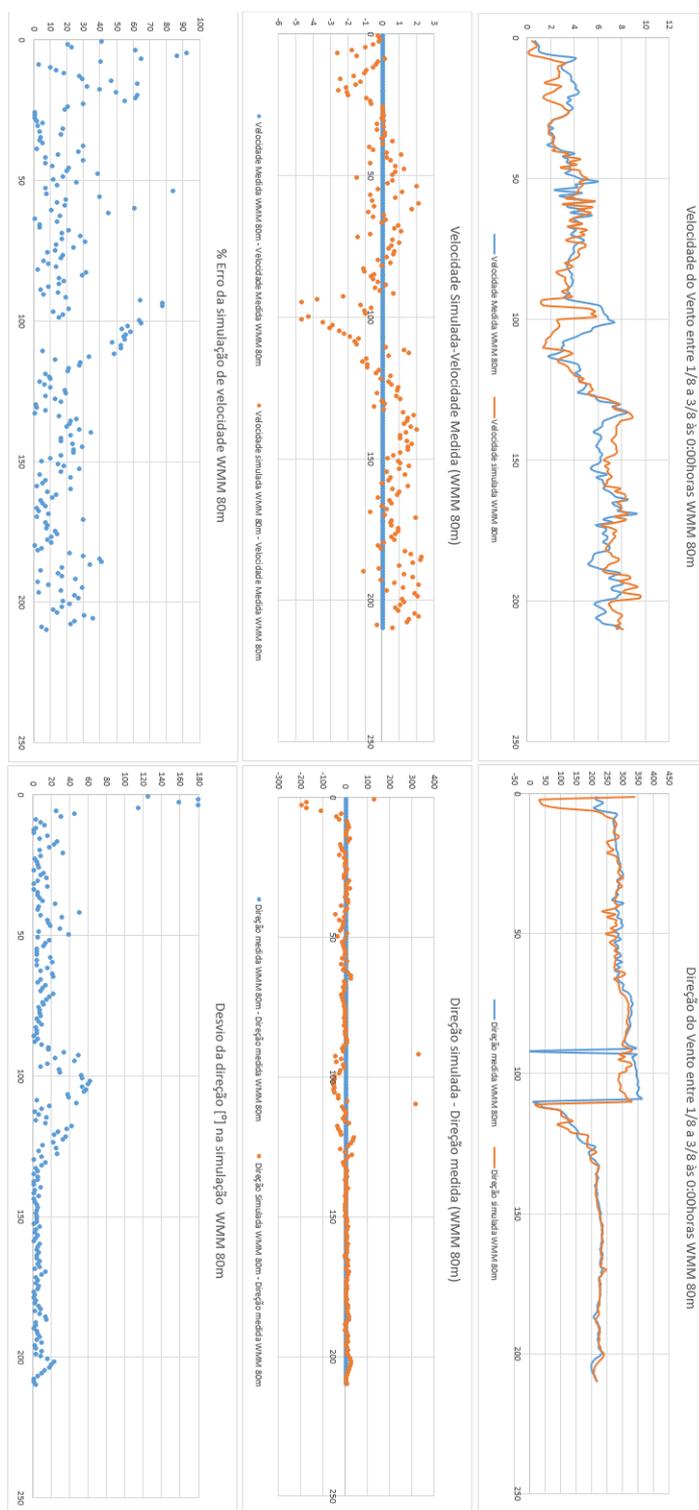


Figura 61 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro de medição WMM a 80m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteiriça iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.

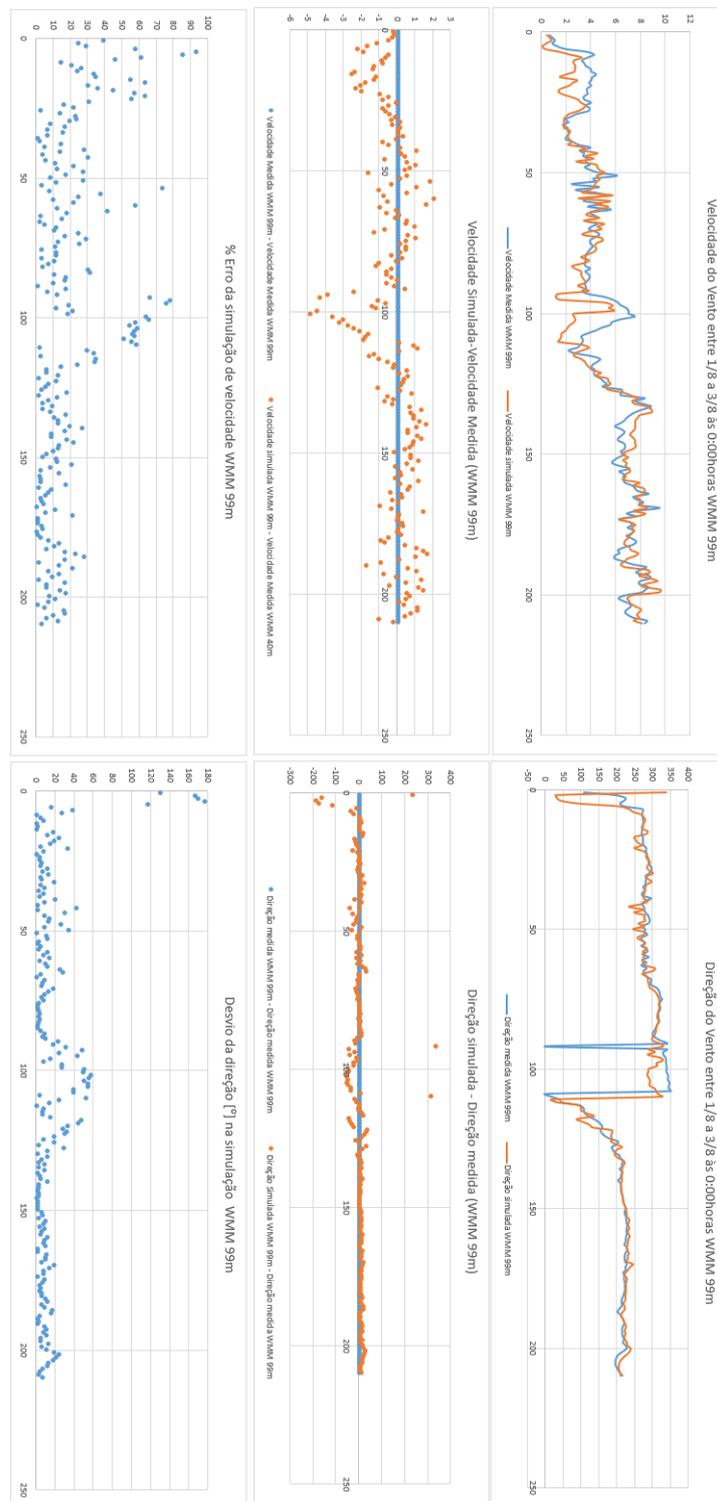


Figura 62 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro de medição WMM a 99m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.

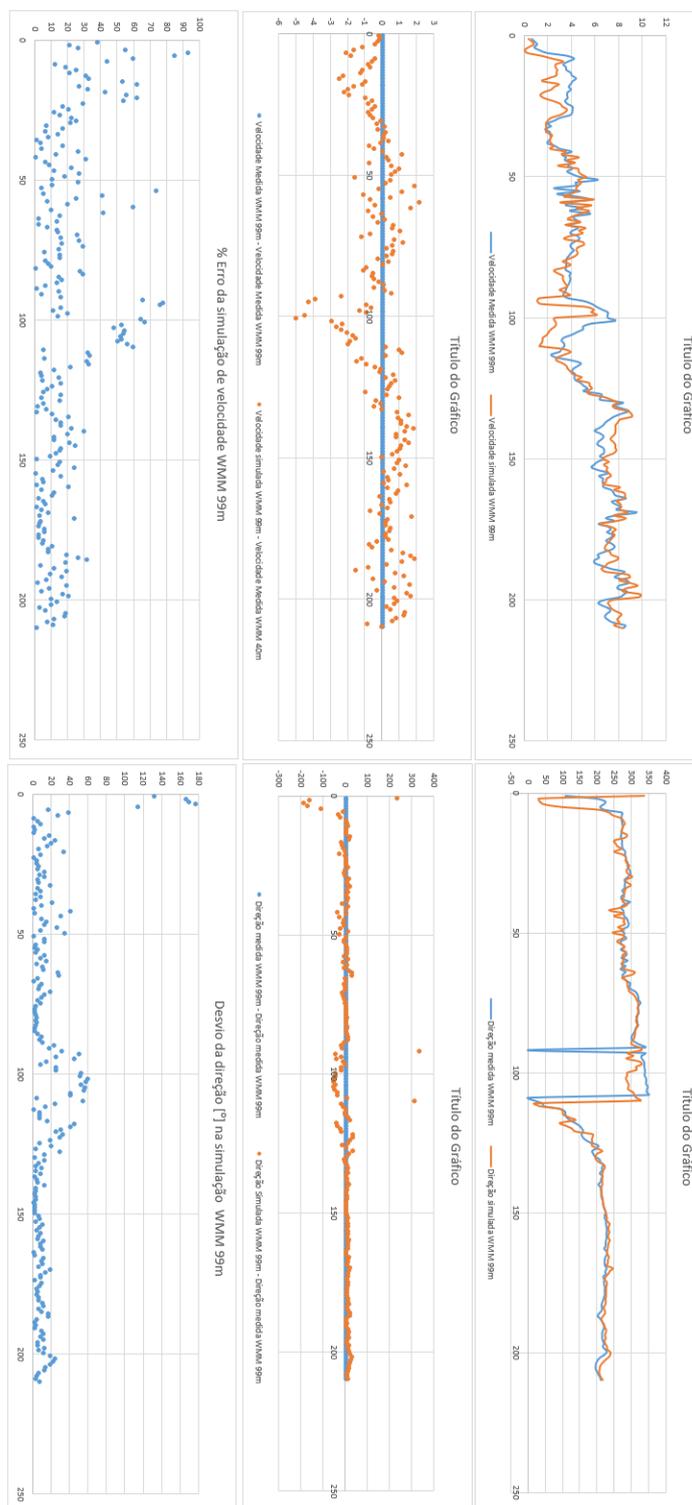


Figura 63 - Comparação dos resultados obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente no mastro de medição WMM a 101m de altura, entre os dias 1/8 e 3/8 de 2016 – Condições fronteira iniciais introduzidas na posição do da turbina T20.