



Universidade de Aveiro Departamento de Física  
2013

**Filipe Augusto Madeira  
Dias**

**Ajuste Estatístico de Modelos de Mesoescala para  
Energia Eólica**





Universidade de Aveiro Departamento de Física  
2013

**Filipe Augusto Madeira  
Dias**

**Ajuste Estatístico de Modelos de Mesoescala para  
Energia Eólica**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Alfredo Rocha, Professor Associado com agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro



## **o júri**

Presidente

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Teresa Maria Fernandes Rodrigues Cabral Monteiro**  
Professor Associado com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Orientador

**Prof. Dr. Alfredo Moreira Caseiro Rocha**  
Professor Associado com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Arguente

**Prof. Dr. João Carlos Andrade dos Santos**  
Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro



## **agradecimentos**

Ao longo de todo o meu percurso académico tive a sorte de poder contar com a presença das pessoas mais importantes da minha vida, às quais venho hoje agradecer o apoio e o carinho que sempre me deram.

Começando por quem me acompanhou toda a vida e aos quais devo este meu percurso, agradeço aos meus pais pelas sempre presentes palavras de incentivo.

À Diana, minha namorada, agradeço todo o apoio, carinho e compreensão.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas pela boa disposição e bom humor.

Ao meu orientador Alfredo Rocha pela disponibilidade, pela ajuda, paciência e orientação ao longo deste trabalho.

Ao Tiago Luna pelos esclarecimentos e pelo apoio.





**palavras-chave**

Energia eólica, modelo WRF, *downscaling*

**resumo**

Este trabalho tem como objetivo obter simulações numéricas de vento, o mais próximo das medidas reais, para posteriormente poderem ser utilizadas para avaliar o potencial eólico e prever a produção de energia eólica. Para tal é aplicado um modelo de ajuste estatístico, nomeadamente uma função polinomial de terceiro grau, ao vento simulado pelo modelo numérico atmosférico WRF. Foram também utilizados quatro métodos de *downscaling* do vento para a simulação dos quatro locais em estudo. Os métodos utilizam várias formas de interpolação nomeadamente linear, logarítmica e polinomial. Em alternativa, em alguns dos métodos escolhe-se o ponto do modelo mais próximo do local.

Para quantificar os erros globais de cada simulação de previsão relativamente às observações, foram calculadas várias medidas de erro nomeadamente, o erro médio, o erro médio quadrático, o desvio padrão do erro e o coeficiente de correlação linear. O ajuste aplicado reduz consideravelmente todos os erros. No entanto, nenhum dos métodos de *downscaling* mostrou ser inequivocamente melhor em todos os mastros e altitudes.



**keywords**

Wind energy, WRF model, downscaling

**abstract**

The purpose of this work is to obtain numerical simulations of the wind closest to the real measurements, to be used to assess the wind potential and predict wind energy production. Statistical adjustments are applied, namely a third degree polynomial function, to wind simulated by atmospheric numerical model WRF. Four downscaling methods were used for the simulation of the four locations considered in the study. The methods use different forms of interpolation namely linear, logarithmic and polynomial. Alternatively, in some of the methods we choose model grid-point of closest to the site.

To quantify the overall error of each forecast simulation relatively to observations, different measures of error were calculated, namely the mean error, quadratic mean error, standard deviation of the error and linear correlation coefficient.

The adjustment applied reduces considerably all errors. However, none of the downscaling methods proved to be clearly the best in all masts and altitudes.



# Índice

1. Introdução .....	1
2. Estado de Arte .....	3
2.1. Análise de aplicações similares .....	3
3. Metodologia e Dados .....	7
3.1. Descrição do modelo de mesoescala WRF .....	7
3.2. Dados .....	9
3.2.1. Dados Medidos .....	9
3.2.2. Dados Previstos .....	10
3.3. Métodos .....	11
3.3.1. Downscaling .....	11
3.3.1.1. Método 0 .....	11
3.3.1.2. Método 1 .....	11
3.3.1.3. Método 2 .....	11
3.3.1.4. Método 3 .....	12
3.3.2. Avaliação de Erros .....	12
4. Resultados e Discussão .....	15
4.1. Métodos de Downscaling .....	15
4.2. Altura de 30 e 60 m .....	21
4.3. Ajuste .....	22
4.4. Decomposição RMSE .....	29
4.5. Predictabilidade de D+1 a D+4 .....	32
5. Conclusões e Trabalho Futuro .....	37
6. Bibliografia .....	41

## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Domínios do WRF utilizados neste estudo. Fonte: Bing Maps. ....	8
<b>Figura 2:</b> Exemplo de um mastro com anemómetros para a medição de dados de velocidade do vento a diferentes alturas [15]. ....	10
<b>Figura 3:</b> $BIAS^2$ para cada mastro de cada método a 30 m de altura. Unidades do quadrado do BIAS, $(m/s)^2$ . ....	17
<b>Figura 4:</b> $BIAS^2$ para cada mastro de cada método a 60 m de altura. Unidades do quadrado do BIAS, $(m/s)^2$ . ....	18
<b>Figura 5:</b> $RMSE^2$ para cada mastro de cada método a 30 m de altura. Unidades do quadrado do RMSE, $(m/s)^2$ . ....	19
<b>Figura 6:</b> $RMSE^2$ para cada mastro de cada método a 60 m de altura. Unidades do quadrado do RMSE, $(m/s)^2$ . ....	19
<b>Figura 7:</b> $STDE^2$ para cada mastro de cada método a 30 m de altura. Unidades do quadrado do STDE, $(m/s)^2$ . ....	20
<b>Figura 8:</b> $STDE^2$ para cada mastro de cada método a 60 m de altura. Unidades do quadrado do STDE, $(m/s)^2$ . ....	20
<b>Figura 9:</b> Coeficiente de correlação para cada mastro de cada método a 30 m de altura.	21
<b>Figura 10:</b> Coeficiente de correlação para cada mastro de cada método a 60 m de altura. ....	21
<b>Figura 11:</b> Relação velocidade real (medida) em função da velocidade prevista, a 30 m de altura para o Mastro A do método 0. ....	22
<b>Figura 12:</b> Relação velocidade real (medida) em função da velocidade prevista ajustada, a 30 m de altura para o Mastro A do método 0. ....	23
<b>Figura 13:</b> $BIAS^2$ do método 0 para os quatro mastros a diferentes alturas, sem e com ajuste, respetivamente. Unidades do quadrado do BIAS, $(m/s)^2$ . ....	26
<b>Figura 14:</b> $RMSE^2$ do método 0 para os quatro mastros a diferentes alturas, sem e com ajuste, respetivamente. Unidades do quadrado do RMSE, $(m/s)^2$ . ....	27
<b>Figura 15:</b> $STDE^2$ do método 0 para os quatro mastros a diferentes alturas, sem e com ajuste, respetivamente. Unidades do quadrado do STDE, $(m/s)^2$ . ....	27
<b>Figura 16:</b> Coeficiente correlação do método 0 para os quatro mastros a diferentes alturas, sem e com ajuste, respetivamente. ....	27
<b>Figura 17:</b> Histograma do erro da velocidade para o mastro A, pelo método 0, a 30 m de altura. ....	28

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Parametrizações utilizadas no WRF. ....	9
<b>Tabela 2:</b> Erros e coeficiente de correlação para o método 0 a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	15
<b>Tabela 3:</b> Erros e coeficiente de correlação para o método 0 a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	15
<b>Tabela 4:</b> Erros e coeficiente de correlação para o método 1 a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	15
<b>Tabela 5:</b> Erros e coeficiente de correlação para o método 1 a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	16
<b>Tabela 6:</b> Erros e coeficiente de correlação para o método 2 a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	16
<b>Tabela 7:</b> Erros e coeficiente de correlação para o método 2 a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	16
<b>Tabela 8:</b> Erros e coeficiente de correlação para o método 3 a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	16
<b>Tabela 9:</b> Erros e coeficiente de correlação para o método 3 a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	17
<b>Tabela 10:</b> Erros e coeficiente de correlação para método 0 com ajuste a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	23
<b>Tabela 11:</b> Erros e coeficiente de correlação para método 0 com ajuste a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	24
<b>Tabela 12:</b> Erros e coeficiente de correlação para método 1 com ajuste a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	24
<b>Tabela 13:</b> Erros e coeficiente de correlação para método 1 com ajuste a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	24
<b>Tabela 14:</b> Erros e coeficiente de correlação para método 2 com ajuste a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	24
<b>Tabela 15:</b> Erros e coeficiente de correlação para método 2 com ajuste a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	25
<b>Tabela 16:</b> Erros e coeficiente de correlação para método 3 com ajuste a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	25
<b>Tabela 17:</b> Erros e coeficiente de correlação para método 3 com ajuste a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, $(m/s)^2$ . ....	25
<b>Tabela 18:</b> Termos de composição do RMSE para método 0 com ajuste a 30 m de altura. Unidades, $(m/s)^2$ . ....	29
<b>Tabela 19:</b> Termos de composição do RMSE para método 0 com ajuste a 60 m de altura. Unidades, $(m/s)^2$ . ....	29
<b>Tabela 20:</b> Termos de composição do RMSE para método 1 com ajuste a 30 m de altura. Unidades, $(m/s)^2$ . ....	29

<b>Tabela 21:</b> Termos de composição do RMSE para método 1 com ajuste a 60 m de altura. Unidades, (m/s) <sup>2</sup> .	30
<b>Tabela 22:</b> Termos de composição do RMSE para método 2 com ajuste a 30 m de altura. Unidades, (m/s) <sup>2</sup> .	30
<b>Tabela 23:</b> Termos de composição do RMSE para método 2 com ajuste a 60 m de altura. Unidades, (m/s) <sup>2</sup> .	30
<b>Tabela 24:</b> Termos de composição do RMSE para método 3 com ajuste a 30 m de altura. Unidades, (m/s) <sup>2</sup> .	30
<b>Tabela 25:</b> Termos de composição do RMSE para método 3 com ajuste a 60 m de altura. Unidades, (m/s) <sup>2</sup> .	31
<b>Tabela 26:</b> BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro A. Unidades, (m/s).	32
<b>Tabela 27:</b> BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro B. Unidades, (m/s).	32
<b>Tabela 28:</b> BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro C. Unidades, (m/s).	32
<b>Tabela 29:</b> BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro D. Unidades, (m/s).	33
<b>Tabela 30:</b> BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro A, com ajuste. Unidades, (m/s).	34
<b>Tabela 31:</b> BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro B, com ajuste. Unidades, (m/s).	34
<b>Tabela 32:</b> BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro C, com ajuste. Unidades, (m/s).	34
<b>Tabela 33:</b> BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro D, com ajuste. Unidades, (m/s).	35
<b>Tabela 34:</b> Melhor método (indicado com 'V') para cada mastro a cada altura, após o ajuste.	39



## Lista de Acrónimos

WRF - Weather Research and Forecasting

RMSE - Erro médio quadrático

BIAS - Erro médio

SDBIAS - Desvio padrão do Bias

STDE - Desvio padrão do erro

DISP - Dispersão

FDDA - Assimilação de dados em quatro dimensões

R - coeficiente de correlação linear (de Pearson)

RMGV - Região Metropolitana da Grande Vitória

NCEP - National Centers for Environmental Prediction

ARW - Advanced Research

NMM - Nonhydrostatic Mesoscale Model

MMM - Mesoscale and Microscale Meteorology

NCAR - Division do National Center for Atmospheric Research

NCEP - National Centers for Environmental Prediction

FSL - Forecast Systems Laboratory

AFWA - Air Force Weather Agency

FAA - Federal Aviation Administration

CAPS - Center of Analysis and Prediction of Storms

CLP - Camada Limite Planetária



# 1. Introdução

A nível mundial, tem havido nas últimas décadas um aumento do consumo de energia, que levou à subida dos preços nas diversas áreas de energia. Desta forma, tem-se verificado o aumento do interesse da produção de energia através de fontes renováveis, para diminuir a utilização dos combustíveis fósseis e evitar assim as consequências do aumento do efeito de estufa. Com isto, evitam-se as emissões gasosas de hidrocarbonetos e de outros compostos químicos, que são prejudiciais ao homem [1,2].

A energia eólica é atualmente considerada, entre as fontes limpas e renováveis de energia, a que apresenta, juntamente com a energia hídrica, um maior estágio de maturidade internacional, sendo que em 2010 atingiu 200 mil MW a nível mundial (*World Wind Market, 2011*).

Verifica-se nos últimos anos, que em Portugal continental, tem havido um esforço para caracterizar o vento, motivado pelo crescente interesse no aproveitamento da energia eólica.

Em todo o mundo existem áreas que potenciam a geração de energia, embora a velocidade do vento varie de região para região, levando a uma rápida expansão do mercado da energia eólica, e como consequência um avanço tecnológico nomeadamente na redução do preço das turbinas eólicas [3].

Devido a escassez de dados e informação de qualidade relativa ao regime de ventos, torna-se difícil caracterizar possíveis áreas para planejar e implementar um projeto eólico. Isto porque, tanto o planeamento como um projeto de um parque eólico necessitam de um conhecimento profundo do regime e do padrão do vento, numa determinada área, limitando investimentos em parques eólicos [4]. Como o vento tem variabilidade espaço/temporal elevada, as observações do vento em uma determinada região devem garantir uma cobertura espacial densa e uma amostragem temporal frequente (alguns minutos) [3].

Outra dificuldade, e uma das mais importantes na produção de energia eólica é a necessidade de se conhecer previamente a quantidade de energia produzida. Para isso, têm-se desenvolvido ao longo dos anos métodos de previsão de ventos [5].

A recolha de informação relativa ao potencial eólico pode ser feita por programas de simulação numérica, através de modelos digitais de terreno, avaliando dados de relevo e rugosidade e dados de vento de superfície, disponíveis através de torres de medição (anemómetros), ou dados de reanálise.

Comparativamente com os métodos de microescala, os modelos de mesoescala captam importantes mecanismos atmosféricos, sendo estes brisas marítimas e terrestres, inversões térmicas, brisas montanha-vale. Sendo indicados para zonas com clima e terrenos complexos, fornecendo uma estimativa mais precisa do potencial eólico, permitindo encontrar as áreas de maior potencial, bem como minimizar o número de torres anemométricas, reduzindo assim os custos de geração, maximizando a produção de energia [1].

Através de modelos de mesoescala é realizada a previsão meteorológica de escalas médias, mas também são capazes de fornecer previsões para altas resoluções, inferiores a 5 km, que são fundamentais no estudo do regime do local de ventos para a implementação de parques eólicos.

Para escalas muito pequenas (poucas centenas de metros), estes modelos demonstram algumas limitações, sendo incapazes de caracterizar de forma detalhada o regime local dos ventos numa determinada área. No entanto, para resoluções horizontais de poucos quilómetros, os modelos são um instrumento útil para a pré-avaliação da implementação de um parque eólico.

O objetivo final do planeamento de um parque eólico é o de caracterizar, da forma mais precisa, o regime do local dos ventos e consequentemente o recurso eólico disponível. Este planeamento envolve várias fases, em que são usados dados observados do regime local dos ventos, obtidos pelas torres anemométricas. Torres estas, aplicadas em locais em que as simulações indicam maior potencial eólico, evitando assim investimentos sem retorno.

Se o projeto for vantajoso financeiramente inicia-se então a implementação do parque eólico [4].

Este presente trabalho tem como objetivo obter simulações numéricas de vento, o mais próximo das medidas reais. Para tal são aplicados modelos de ajuste estatístico a vento simulado por modelos de mesoescala. São ainda testados vários métodos de *downscaling* para converter os dados simulados num ponto da malha do modelo para um local com coordenadas geográficas não necessariamente coincidentes com as do referido ponto da malha. Os dados simulados são avaliados por comparação com dados observados para posteriormente poderem ser utilizados para avaliar o potencial eólico e prever a produção de energia eólica.

Esta dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, em que o primeiro é a introdução, seguido pelo segundo capítulo, o estado de arte, sobre o modelo de previsão do tempo em mesoescala WRF e apresentando uma análise de alguns estudos relacionados com o modelo de mesoescala WRF, bem como com os critérios estatísticos para avaliar os erros das simulações.

O capítulo três descreve a metodologia e dados usados, e está dividido em vários subcapítulos. O primeiro subcapítulo é uma breve descrição do modelo WRF, o segundo é relativo à metodologia de avaliação usada e por fim os dados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e as respetivas discussões, que depois servirão para retirar as conclusões no capítulo cinco.

## 2. Estado de Arte

O estado do tempo tem impacto no quotidiano do ser humano, daí que modelos de previsão do tempo em mesoescala antigos tenham sofrido alterações, dando origem a novos modelos, como é o caso do modelo de WRF (*Weather Research and Forecasting*) [6]. Apesar do modelo WRF ser utilizado na Europa, foi na América do Norte, em 2005, que este foi usado pela primeira vez [7].

Nos últimos anos novas versões do modelo WRF foram lançadas pela comunidade científica, por forma a melhorar o modelo de previsão do tempo.

Foram realizados vários estudos relativos à utilização do modelo de previsão do tempo em mesoescala WRF, como forma de pré-avaliação para a implementação de um projeto eólico.

Na análise seguinte estão apresentados alguns estudos relacionados com o modelo WRF relevantes para a elaboração deste trabalho bem como estudos relacionados com os critérios estatísticos para avaliação dos erros globais de cada simulação utilizados, que consistem no erro médio quadrático (RMSE), no erro médio (BIAS) e no desvio padrão do erro (STDE). Para além do cálculo dos erros, foi considerado o coeficiente de correlação (R), por forma a aferir a correlação existente entre as séries previstas e medidas.

### 2.1. Análise de aplicações similares

**[4] "Optimização do modelo numérico de previsão do tempo WRF no contexto de previsão e produção de energia eólica"**- Este trabalho propõe-se avaliar e testar a qualidade das simulações da intensidade e direção do vento próximo da superfície, utilizando o modelo numérico de simulação atmosférica WRF-ARW, otimizando-o de modo a ser avaliada a sua possível utilização em outras áreas de investigação e aplicação prática, nomeadamente no planeamento de parques eólicos e estimativas de produção de energia eólica.

No capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados referentes aos diferentes blocos de testes. Para cada um destes blocos, são apresentadas comparações entre séries temporais de intensidade e direção do vento (relativamente aos dados observados), bem como o RMSE, BIAS e STDE. São também apresentados coeficientes de correlação e desvios globais relativamente aos dados observados entre as várias séries.

Por exemplo, no bloco A, foram feitas três simulações, a A1, em que o modelo correu continuamente para um mês de simulação, a A2, similar à simulação A1, mas com a opção de incluir nos seus métodos de cálculo a assimilação de dados em quatro dimensões (FDDA) ativa e a A3, que é similar à A2, mas em vez de o modelo correr continuamente, foram simulados vários segmentos de simulações de dois dias e doze horas cada um.

Os dados obtidos das medidas de erro relativas à velocidade para as três simulações, mostraram que o RMSE, em todas as simulações apresentou valores muito próximos, tendo a simulação A3 apresentado o RMSE mais elevado. O mesmo aconteceu com o BIAS. Todas as simulações apresentaram um BIAS negativo na velocidade (subestimação da velocidade do vento).

O coeficiente de correlação ao quadrado ( $R^2$ ) está entre os 0,68 e os 0,77. Sendo a simulação A3 a que apresentou um maior coeficiente de correlação para a velocidade.

Conclui-se que a simulação A3 foi a que obteve melhores resultados.

**[8] “Validação de estimativas do recurso eólico obtidas com o modelo numérico WRF”** - Neste trabalho foi avaliada a qualidade das previsões dos dados de vento produzidos pelo modelo de previsão numérica WRF-ARW. Os locais em análise foram Portugal, Polónia, Roménia e Cabo Verde, onde foram realizadas uma ou mais simulações para cada local. Isto para obter períodos de 6 ou 12 meses de dados simultâneos com estações anemométricas a operar nos domínios em questão.

Os parâmetros estatísticos utilizados neste trabalho foram o RMSE, BIAS, o STDE, o coeficiente de correlação, e a semelhança entre as rosas-dos-ventos, rosas-dos-ventos de produção de energia e histograma da intensidade do vento.

Relativamente aos resultados verifica-se que para Portugal obteve-se um BIAS próximo de zero, sendo que o modelo sobrestima o recurso eólico no Inverno e subestima no Verão.

No caso da Polónia, apresenta uma sobrestimativa média de 12% relativamente à velocidade do vento, um coeficiente de correlação na ordem dos 0,82.

Para a Roménia a velocidade do vento é subestimada na ordem dos 10%, com um BIAS de 0,643 e um coeficiente de correlação de 0,84.

Em Cabo Verde são verificados os maiores desvios, na ordem dos 20% a menos na velocidade do vento e um coeficiente de correlação entre 0,70 e 0,92.

**[9] “Simulação da camada limite planetária sobre a região metropolitana da Grande Vitória com o uso do modelo de mesoescala WRF”** - O principal objetivo deste trabalho foi utilizar o modelo matemático de mesoescala WRF para realizar a simulação do comportamento temporal e espacial da Camada Limite Planetária sobre a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) no Espírito Santo. Os dados experimentais foram fornecidos por várias estações meteorológicas e o Inverno e o Verão foram os períodos em estudo. Concluíram que WRF obtém um melhor ajuste para o período do verão. Relativamente à temperatura potencial e à temperatura a 2 m, estas encontram-se bem representadas nos dois períodos. No entanto, a velocidade do vento a 10 m mostra que em determinadas regiões o modelo não obteve um resultado satisfatório.

**[10] “On the uncertainty of wind power predictions-analysis of the forecast accuracy and statistical distribution of errors”** - Neste trabalho foi analisada a incerteza da previsão da força do vento, focando-se no importante papel da curva de força não-linear. O estudo baseou-se em previsões numéricas e dados obtidos através de seis parques eólicos “onshore”. Para distinguir as diferentes fontes de erro recorreu-se a uma decomposição do erro quadrático. Concluíram que relativamente à precisão da previsão, esta encontra-se relacionada com a curva de força e o erro relativo da previsão da força aumenta numa proporção de 1,8-2,6, comparado com a previsão da velocidade do vento. Este ponto pode ser considerado um facto de não-linearidade efetiva que ocorre convertendo força de vento para força de *output*. Verificaram também, que uma decomposição do RMSE apropriada é vantajosa para separar a amplitude de erros de fase e que a amplitude de erros da previsão da velocidade do vento é influenciada pelas características do local.

[11] ***“The firstlook global wind dataset: Annual mean validation”***- O objetivo deste trabalho depreende-se com a validação do mapa de ventos produzido para todo o globo com a resolução horizontal de 2 arco-segundos. Ao todo, foram consideradas 4000 estações meteorológicas localizadas a 10 metros do solo do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) dispersas por todo o mundo que serviram de base para a avaliação do mapa. Na América do Norte foram utilizadas 2420, 304 para a América do Sul, 229 para África, 871 para a Europa, 289 para a Ásia e 42 para a Austrália, o que dá um total de 4155 estações. O BIAS varia entre -0,19 m/s e os +0,65 m/s e o RMSE entre 0,77 m/s e 1,15 m/s. Concluiu-se que para terreno simples, o mapa de vento produzido pela 3TIER está bem representado. No entanto, verifica-se que quanto mais complexo for o terreno e quanto mais se localizar perto da costa as discrepâncias são mais elevadas.

[12] ***“From Observations to Forecasts – Part 12: Getting the most out of model data”*** - Este artigo descreve os métodos de pós-processamento em uso atualmente no Met Office para produzir previsões automatizadas para os próximos cinco dias, e para dar uma contribuição para o processo de decisão de previsão manual. São utilizados vários métodos de downscaling, entre os quais o de interpolação bilinear na horizontal e linear na vertical, logarítmica na vertical, entre outros.





### 3. Metodologia e Dados

#### 3.1. Descrição do modelo de mesoescala WRF

O modelo de mesoescala WRF consiste num sistema de modelação numérica da atmosfera. Está direcionado para a previsão do tempo em mesoescala e para pesquisar fenómenos atmosféricos de microescala e mesoescala, sendo considerado uma ferramenta de topo nesta área. Dois núcleos dinâmicos de processamento estão presentes neste modelo: ARW (*Advanced Research WRF*) e NMM (*Nonhydrostatic Mesoscale Model*).

Desenvolveu-se através do trabalho de vários centros de investigação e agências governamentais, tais como Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM), Division do National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Oceanic and Atmospheric Administration, National Centers for Environmental Prediction (NCEP), Forecast Systems Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory, Oklahoma University, Federal Aviation Administration (FAA), o Center of Analysis and Prediction of Storms (CAPS) e pela cooperação de pesquisadores de outras universidades.

É um sistema flexível, portátil, com a possibilidade de executar em sistemas de processamento paralelo e em várias plataformas de computação, bem como ser usado em várias escalas de comprimento, tendo a vantagem de ser de domínio público, disponível de forma gratuita.

As aplicações são variadas e vão desde previsões numéricas do tempo, previsão da qualidade do ar, pesquisas de parametrizações físicas, assimilação de dados, acoplamento com modelos de previsões oceânicas, dispersão de poluentes atmosféricos e simulações idealizadas [6,9,13].

Este modelo resolve o seguinte conjunto de equações (1 a 5) denominadas equações primitivas, em coordenadas esféricas [6]:

$$\frac{du}{dt} - \frac{uv \tan \Phi}{a} + \frac{uw}{a} = -\frac{1}{\rho a \cos \Phi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + 2\Omega v \sin \Phi - 2\Omega w \cos \Phi + F_{r\lambda} \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan \Phi}{a} + \frac{vw}{a} = -\frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial \Phi} - 2\Omega u \sin \Phi + F_{r\Phi} \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} - \frac{u^2 + v^2}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + 2\Omega u \cos \Phi + F_{rz} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{V}) \quad (4)$$

$$C_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = J \quad (5)$$

Onde  $t$  corresponde ao tempo,  $u$ ,  $v$  e  $w$  correspondem à componente zonal, meridional e vertical do vento, respetivamente.  $\Phi$  corresponde à latitude,  $a$  representa o raio da Terra,  $\rho$  corresponde à densidade,  $p$  corresponde à pressão,  $\lambda$  corresponde à longitude,  $\Omega$  corresponde à velocidade angular e  $g$  é a aceleração gravítica.  $C_v$  corresponde ao calor específico a volume constante,  $T$  corresponde à temperatura,  $\alpha$  corresponde ao volume específico e  $J$  corresponde à fonte diabática de energia [6].

Este sistema de equações diferenciais simultâneas pode ser integrado no tempo, a partir de condições iniciais e conhecendo as condições de fronteira.

Para realizar este estudo foram utilizados 2 domínios espaciais.

O primeiro domínio (d1) engloba uma grande extensão da Península Ibérica e do Oceano Atlântico. Este apresenta uma resolução horizontal de 25 km (Figura 1). O segundo domínio (d2) inclui Portugal continental e uma pequena extensão da área de Espanha adjacente. Este tem uma resolução horizontal de 5 km.



**Figura 1:** Domínios do WRF utilizados neste estudo. Fonte: Bing Maps.

O WRF utiliza coordenadas eta,  $\eta$ , determinadas através da seguinte expressão [6],

$$\eta = \frac{p(z) - p_t}{p(z=0) - p_t} \quad (6)$$

Onde  $p(z)$  corresponde à pressão à altitude  $z$ ,  $p_t$  corresponde à pressão no topo da atmosfera do modelo e  $p(z=0)$  corresponde à pressão atmosférica padrão ao nível médio do mar ( $P=1013$  hPa) [6].

As parametrizações utilizadas no WRF, para o estudo, foram as indicadas na tabela 1 [14].

**Tabela 1:** Parametrizações utilizadas no WRF.

Parametrizações	Opções selecionadas
Radiação de grande comprimento de onda	rrtm scheme
Radiação de pequeno comprimento de onda	Dudhia scheme
Camada a superfície	Monin-Obukhov scheme
Solo	Noah land-surface model
Cúmulos	Grell-Devenyi ensemble scheme
Microfísica	WSM 6-class graupel scheme
Camada limite	YSU scheme

## 3.2. Dados

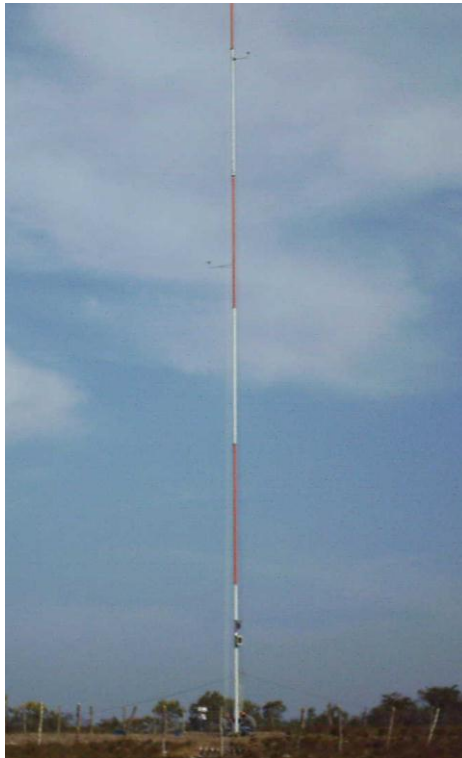
### 3.2.1. Dados Medidos

Para este trabalho foram utilizados dados medidos da velocidade do vento por quatro mastros com anemómetros a 30 e 60 m de altura, durante um ano. Estes dados têm uma amostragem temporal de 1 hora.

Por motivos de confidencialidade, os locais exatos dos mastros não são divulgados, sendo apenas descritas as características dos terrenos e a sua localização, se litoral ou interior da zona centro de Portugal.

O mastro A está localizado num terreno plano no Litoral, já o mastro D também se situa no litoral, mas num terreno um pouco complexo. Relativamente aos restantes dois mastros (B e C), ambos localizam-se no Interior em terrenos montanhosos.

Por vezes, os dados medidos pelos anemómetros registam pequenas anomalias, tornando-os inválidos. Estas devem-se a vários fatores, tais como condições atmosféricas adversas e avarias dos equipamentos de medição. Todos os dados que apresentam anomalias foram excluídos para o estudo.



**Figura 2:** Exemplo de um mastro com anemômetros para a medição de dados de velocidade do vento a diferentes alturas [15].

### 3.2.2. Dados Previstos

Após a aquisição dos dados previstos pelo WRF para cada método, foi necessário, pelo motivo anteriormente mencionado relativamente às pequenas anomalias nos dados medidos, criar uma forma para sincronizar os dados medidos obtidos com os adquiridos com o modelo WRF pelas datas e horas equivalentes. Para o efeito, foi construído um programa em *MatLab*, por forma a diminuir o tempo e a quantidade de trabalho. De salientar que os dados previstos tiveram que ser divididos por mastros, já que estavam todos agrupados. Para o método 0 teve que ser dividido também por horizontes temporais de previsão, de D+1 a D+4, em que D significa dia e +1 por exemplo, mais um dia. Esta divisão só foi efetuada para o método 0, pois era o único método para o qual dispunha dos dados medidos para os vários horizontes temporais.

Depois de todo o trabalho inerente à sincronização, passou-se para os cálculos dos erros, BIAS, STDE, RMSE e os termos da sua composição, bem com a realização dos histogramas e gráficos relativos à velocidade e aos erros associados.

A partir dos gráficos da relação entre a velocidade real (medida) e a velocidade prevista foi efetuado um ajuste com o objetivo de aproximar os dados previstos aos medidos e consequentemente diminuir os erros.

Por fim os erros e as componentes da decomposição do RMSE foram recalculados para os dados ajustados.

### 3.3. Métodos

#### 3.3.1. Downscaling

Neste subcapítulo serão descritos os quatro métodos de *downscaling* utilizados na obtenção dos dados simulados/previstos em pontos da malha do modelo para locais onde o vento foi medido pelos anemómetros colocados nos mastros [12].

##### 3.3.1.1. Método 0

No método 0 foi efetuada, partindo de uma malha irregular no plano horizontal, uma interpolação para uma malha regular mais fina que a de origem (proveniente do modelo atmosférico). Como forma de obter os dados de vento para os locais desejados foi determinado qual o ponto da grelha (fina) mais próximo. A interpolação vertical efetuada para extrair os dados para as duas alturas resulta de uma interpolação linear entre dois níveis verticais do modelo atmosférico no ponto da grelha (fina) mais próximo ao local do mastro com anemómetros.

##### 3.3.1.2. Método 1

Neste método partiu-se de uma malha no plano horizontal (proveniente do modelo atmosférico). É então realizada uma interpolação bilinear para as coordenadas geográficas dos mastros. Para extrair os dados para as duas alturas é realizada uma interpolação linear vertical entre dois níveis verticais do modelo atmosférico.

##### 3.3.1.3. Método 2

Neste método, o ponto de partida consiste numa malha no plano horizontal. O ponto da grelha (proveniente do modelo atmosférico) mais próximo geograficamente ao mastro é assim determinado. Através de um perfil logaritmo (*log wind profile*) é efetuada a interpolação vertical, sendo que este perfil é obtido recorrendo-se à seguinte expressão [16]:

$$U(h) = \frac{U^*}{\left(k \cdot \left(\ln \frac{h}{z_0} + \alpha\right)\right)} \quad (7)$$

Onde,

$U(h)$ : é a intensidade do vento à altura  $h$  (m/s)

$U^*$  : é a velocidade de atrito

$k$  : é a constante de Von Kármán (0,4)

$h$  : é a altura (acima do solo em metros) a que se pretende obter a intensidade do vento

$z_0$  : é a rugosidade da superfície (em metros)

$\alpha$ : parâmetro de estabilidade

O parâmetro de estabilidade é uma função por ramos com relações empíricas aplicadas em função da estabilidade da atmosfera, admitindo três soluções (estável, instável ou neutro).

É determinado tendo por base o comprimento de Monin-Obukhov. O comprimento de Monin-Obukhov, dado pela equação (8), é a altura da CLP onde os efeitos da turbulência mecânica se equivalem aos efeitos da turbulência convectiva [17,18].

$$L = - \frac{u_*^3 \bar{\theta}_v}{kg(\overline{w'\theta'_v})} \quad (8)$$

Onde  $u_*$  é a velocidade de atrito,  $\bar{\theta}_v$  é a temperatura potencial virtual média,  $(\overline{w'\theta'_v})$  é o fluxo vertical de calor e  $k$  é a constante de Von Kármán ( $k=0,4$ ) [18].

### 3.3.1.4. Método 3

Neste método, através de uma malha irregular no plano horizontal, define-se qual o ponto da grelha (proveniente do modelo atmosférico) mais próximo geograficamente ao mastro. Através de uma função polinomial de terceiro grau é realizada a interpolação vertical. Para os 6 níveis verticais mais próximos do solo é realizado o ajuste da função polinomial. Obtêm-se assim, os dados de vento para as alturas desejadas que são o resultado do valor do polinômio aplicado ao vento para a altura desejada.

### 3.3.2. Avaliação de Erros

Várias medidas estatísticas comparativas entre as séries de dados medidos e previstos foram utilizadas para efetuar a avaliação dos erros.

Nesta dissertação, a grandeza analisada para a avaliação do comportamento do vento passou pela velocidade do vento.

Para quantificar os erros globais de cada simulação de previsão, foram utilizados como critérios estatísticos: o BIAS, o RMSE, o STDE e o coeficiente de correlação (R).

Para a avaliação do grau de semelhança entre duas séries de tempo, utilizam-se geralmente medidas de erro baseadas na diferença entre a previsão ( $\Phi_p$ ), e medição ( $\Phi_m$ ), isto é [19];

$$\Phi' = \Phi_p - \Phi_m \quad (9)$$

O afastamento entre os valores previstos e os valores medidos é traduzido pelo cálculo dos dois tipos de erros médios. Foram aplicadas as seguintes equações [19]:

o erro médio,

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Phi'_i \quad (10)$$

e o erro médio quadrático,

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Phi'_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Onde, o desvio entre um valor individual de previsão e um valor medido no mesmo local e no mesmo instante é representado por,  $\Phi'$ , em que N, consiste no número de verificações.

Através do BIAS é possível avaliar o enviesamento dos dados. Quando este é positivo, significa que as previsões tendem a sobrestimar os valores observados, sendo o contrário quando este é negativo.

Para obter uma medida da dispersão do erro, calculou-se o desvio padrão do erro [10,19]:

$$\begin{aligned} STDE &= \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \Phi'_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Phi'_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= [ (RMSE)^2 - (BIAS)^2 ]^{1/2} \end{aligned} \quad (12)$$

O RMSE é melhor quanto mais próximo de zero estiver, sendo uma medida muito popular entre as várias existentes para quantificar a precisão da previsão. Pode ser dividido em significativas partes. Partes estas, que vão ser muito importantes para esclarecer sobre as diferentes fontes de erro.

Facilmente o RMSE pode ser expresso nos termos, BIAS e variância do erro. Sendo que, a variância do erro pode ser dividida em duas partes. Uma relativa aos erros de amplitude e outra aos erros de fase.

Quando as previsões descrevem corretamente a evolução temporal das medidas, mas com uma subestimação ou sobrestimação relativamente à situação real, estas estão relacionadas com os erros de amplitude.

Relativamente aos erros de fase, estes ocorrem quando a amplitude da previsão chega cedo ou tarde demais, apesar de estar correta.

A decomposição do RMSE é dada pela seguinte expressão [10]:

$$RMSE^2 = BIAS^2 + STDE^2 = BIAS^2 + SDBIAS^2 + DISP^2 \quad (13)$$

Em que,

$$BIAS = \overline{\Phi'}$$

$$STDE = \sigma(\Phi')$$

$$SDBIAS = \sigma(\Phi_p) - \sigma(\Phi_m)$$

$$DISP = \sqrt{2\sigma(\Phi_p)\sigma(\Phi_m)(1 - R_{p,m})}$$

onde,  $R_{p,m}$  é o coeficiente de correlação entre as duas séries de tempo e o  $\sigma(\Phi_p)$  ou  $\sigma(\Phi_m)$  são os desvios padrão das previsões e medições, respetivamente.

O BIAS é o valor médio da diferença entre o valor da previsão e o da medição.

O STDE mede as flutuações do erro em torno da média, e tem duas contribuições:

O SDBIAS, que é a diferença entre o desvio padrão de  $(\Phi_p)$  e  $(\Phi_m)$ , que juntamente com o BIAS indica erros de amplitude.

O DISP envolve o coeficiente de correlação cruzada com o desvio padrão das duas séries de tempo, e contribui para erros de fase [10].

As previsões mais acertadas implicam um RMSE menor. O BIAS não fornece a melhor indicação do acerto das previsões com as medições. Um BIAS menor em valor absoluto, relativamente a um mesmo conjunto de observações, não significa que as previsões sejam mais acertadas, a menos que o STDE seja muito inferior ao RMSE [13].

$$STDE^2 \ll RMSE^2 \Leftrightarrow RMSE^2 \sim BIAS^2 \quad (14)$$

$$STDE^2 \sim RMSE^2 \Leftrightarrow BIAS^2 \ll RMSE^2 \quad (15)$$



## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Métodos de Downscaling

Foram calculados os vários erros, BIAS, STDE, RMSE e os termos da sua composição para cada um dos quatro métodos de *downscaling*.

Os cálculos foram realizados unicamente para um horizonte, D+1, de cada mastro a alturas de 30 e 60 m. Valores esses apresentados nas tabelas de 2 a 9.

**Tabela 2:** Erros e coeficiente de correlação para o método 0 a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

Método 0				
Altura 30				
	STDE <sup>2</sup>	RMSE <sup>2</sup>	BIAS <sup>2</sup>	R
<b>Mastro A</b>	5,39	8,47	3,08	0,70
<b>Mastro B</b>	5,04	5,20	0,15	0,77
<b>Mastro C</b>	9,08	10,00	0,92	0,62
<b>Mastro D</b>	4,46	4,55	0,09	0,70

**Tabela 3:** Erros e coeficiente de correlação para o método 0 a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

Método 0				
Altura 60				
	STDE <sup>2</sup>	RMSE <sup>2</sup>	BIAS <sup>2</sup>	R
<b>Mastro A</b>	5,75	6,79	1,04	0,73
<b>Mastro B</b>	5,45	5,64	0,19	0,79
<b>Mastro C</b>	9,20	9,62	0,42	0,65
<b>Mastro D</b>	5,12	5,57	0,45	0,71

**Tabela 4:** Erros e coeficiente de correlação para o método 1 a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

Método 1				
Altura 30				
	STDE <sup>2</sup>	RMSE <sup>2</sup>	BIAS <sup>2</sup>	R
<b>Mastro A</b>	8,66	17,29	8,63	0,69
<b>Mastro B</b>	6,21	7,57	1,35	0,79
<b>Mastro C</b>	9,97	10,02	0,05	0,66
<b>Mastro D</b>	5,13	6,91	1,78	0,74

**Tabela 5:** Erros e coeficiente de correlação para o método 1 a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

<b>Método 1</b>				
	<b>Altura 60</b>			
	<b>STDE<sup>2</sup></b>	<b>RMSE<sup>2</sup></b>	<b>BIAS<sup>2</sup></b>	<b>R</b>
<b>Mastro A</b>	11,11	20,91	9,80	0,72
<b>Mastro B</b>	8,92	13,77	4,86	0,80
<b>Mastro C</b>	12,98	15,15	2,16	0,68
<b>Mastro D</b>	7,02	11,25	4,23	0,74

**Tabela 6:** Erros e coeficiente de correlação para o método 2 a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

<b>Método 2</b>				
	<b>Altura 30</b>			
	<b>STDE<sup>2</sup></b>	<b>RMSE<sup>2</sup></b>	<b>BIAS<sup>2</sup></b>	<b>R</b>
<b>Mastro A</b>	2,64	2,76	0,12	0,76
<b>Mastro B</b>	6,84	6,87	0,03	0,71
<b>Mastro C</b>	9,82	12,06	2,24	0,57
<b>Mastro D</b>	6,15	6,96	0,81	0,59

**Tabela 7:** Erros e coeficiente de correlação para o método 2 a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

<b>Método 2</b>				
	<b>Altura 60</b>			
	<b>STDE<sup>2</sup></b>	<b>RMSE<sup>2</sup></b>	<b>BIAS<sup>2</sup></b>	<b>R</b>
<b>Mastro A</b>	4,75	5,33	0,58	0,70
<b>Mastro B</b>	8,83	8,83	0,00	0,70
<b>Mastro C</b>	11,63	12,02	0,39	0,57
<b>Mastro D</b>	8,92	10,26	1,34	0,53

**Tabela 8:** Erros e coeficiente de correlação para o método 3 a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

<b>Método 3</b>				
	<b>Altura 30</b>			
	<b>STDE<sup>2</sup></b>	<b>RMSE<sup>2</sup></b>	<b>BIAS<sup>2</sup></b>	<b>R</b>
<b>Mastro A</b>	8,54	16,78	8,23	0,69
<b>Mastro B</b>	6,00	7,04	1,04	0,79
<b>Mastro C</b>	9,60	9,64	0,04	0,65
<b>Mastro D</b>	4,99	6,05	1,06	0,73

**Tabela 9:** Erros e coeficiente de correlação para o método 3 a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

Método 3				
	Altura 60			
	STDE <sup>2</sup>	RMSE <sup>2</sup>	BIAS <sup>2</sup>	R
<b>Mastro A</b>	8,83	13,84	5,02	0,73
<b>Mastro B</b>	6,73	7,98	1,25	0,81
<b>Mastro C</b>	9,93	10,26	0,33	0,68
<b>Mastro D</b>	5,64	6,28	0,64	0,75

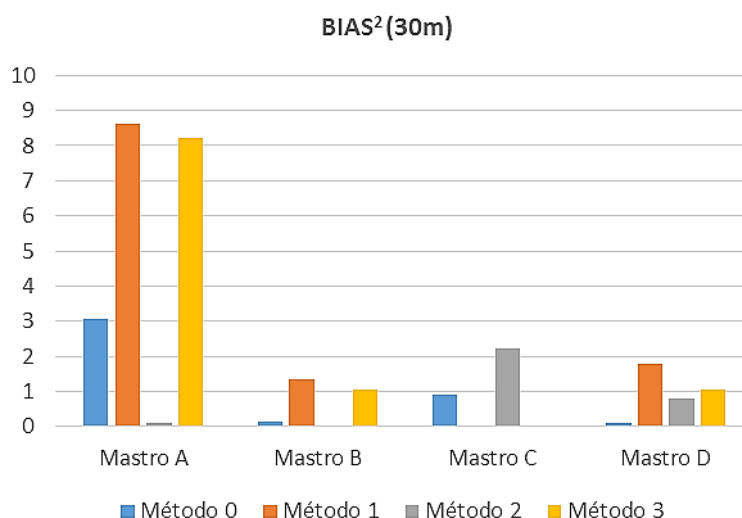
Para obter uma melhor análise dos resultados foram efetuados gráficos para o BIAS<sup>2</sup>, RMSE<sup>2</sup>, STDE<sup>2</sup> e R para as diferentes alturas.

As figuras 3 e 4 são referentes ao BIAS<sup>2</sup>, um para a altura de 30 m e outro para 60 m, respetivamente.

Pela figura 3, podemos verificar que a 30 m de altura o mastro A é o que apresenta maior BIAS<sup>2</sup> em todos os métodos, exceto com o método 2. Sendo o método 1 o que tem maior valor, seguido do método 3.

No mastro B e D o BIAS<sup>2</sup> é superior pelos métodos 1 e 3.

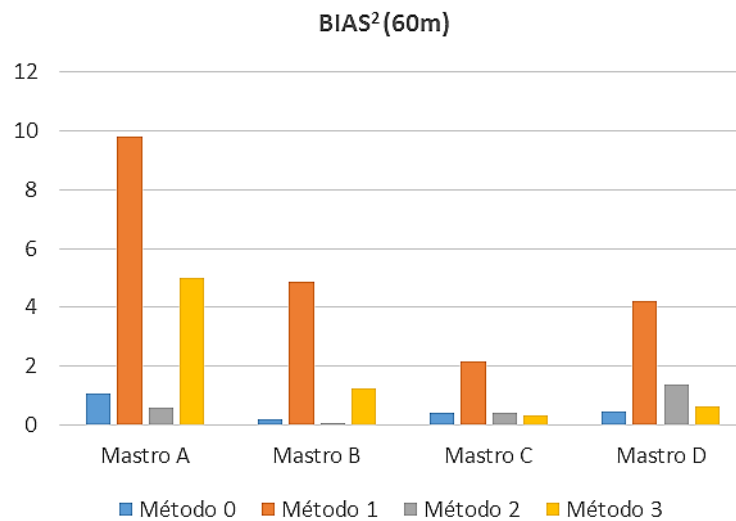
O mastro C, pelo método 1 e 3, tem valor praticamente nulo, enquanto que no mastro D é o método 0 e no mastro B é o método 2.



**Figura 3:** BIAS<sup>2</sup> para cada mastro de cada método a 30 m de altura. Unidades do quadrado do BIAS, (m/s)<sup>2</sup>.

Na figura 4, a altura de 60 m, verificamos o mesmo do que na figura 3 relativamente ao mastro A, pelo método 1 e 3 os valores de BIAS<sup>2</sup> são muito maiores comparativamente aos outros métodos. Os métodos com valores de BIAS<sup>2</sup> mais baixos para os mastros A e B são os métodos 0 e 2.

Para o mastro C, o BIAS<sup>2</sup> é menor pelo método 3. No mastro D o método 0 é o que apresenta menor BIAS<sup>2</sup>.



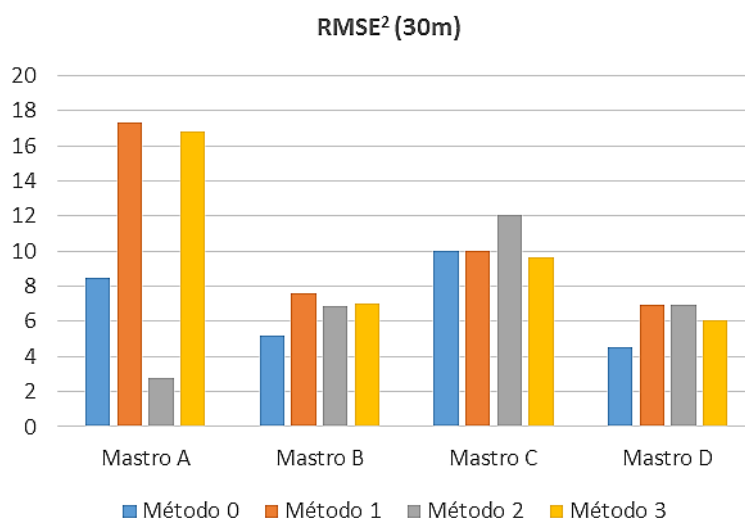
**Figura 4:**  $BIAS^2$  para cada mastro de cada método a 60 m de altura. Unidades do quadrado do BIAS,  $(m/s)^2$ .

Em seguida são apresentados os gráficos de  $RMSE^2$  a diferentes alturas. Pela figura 5 verifica-se que pelo método 1 e 3, o mastro com maior valor de  $RMSE^2$  é o A e o com menor valor é o D. Em comparação ao mastro C de cada método, verifica-se que o método 2 é o que apresenta maior valor de  $RMSE^2$ .

O mastro A, pelo método 2, é o que apresenta o valor mais baixo de  $RMSE^2$  e o mastro A no método 1 é o que apresenta o valor mais alto.

Para o mastro C, o método que apresenta menor valor de  $RMSE^2$  é o método 3, enquanto que para o mastro B e D o método que apresenta menor valor de  $RMSE^2$  é o método 0.

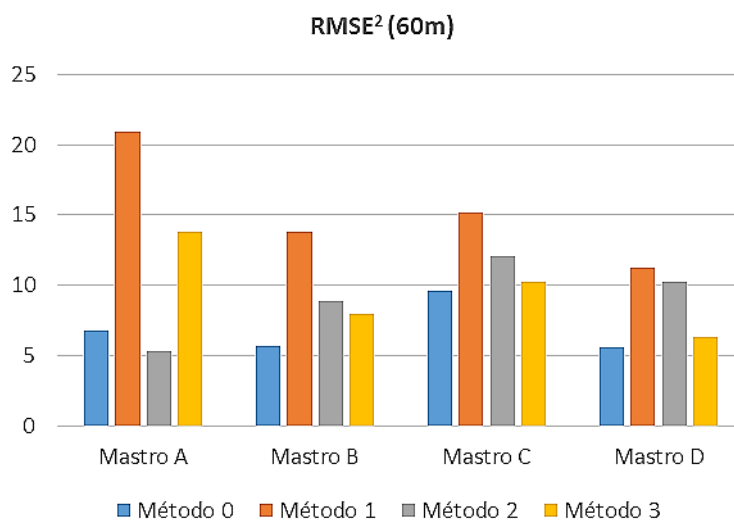
Sabendo que quanto mais próximo de zero o valor do  $RMSE^2$  for, melhor será a previsão, e posto isso, podemos afirmar que o método 2 é o método que melhor prevê o mastro A, o método 3 é o que melhor prevê o mastro C e o método 0 é o que melhor prevê o mastro B e D, para a altura de 30 m.



**Figura 5:**  $RMSE^2$  para cada mastro de cada método a 30 m de altura. Unidades do quadrado do RMSE,  $(m/s)^2$ .

Relativamente à altura a 60 m, figura 6, verifica-se que com o método 1 e 3 o mastro A é o que apresenta maior valor de  $RMSE^2$ .

O método 2 é o que apresenta menor valor de  $RMSE^2$  para o Mastro A, enquanto para os restantes mastros, o método que menor valor de  $RMSE^2$  tem é o método 0.

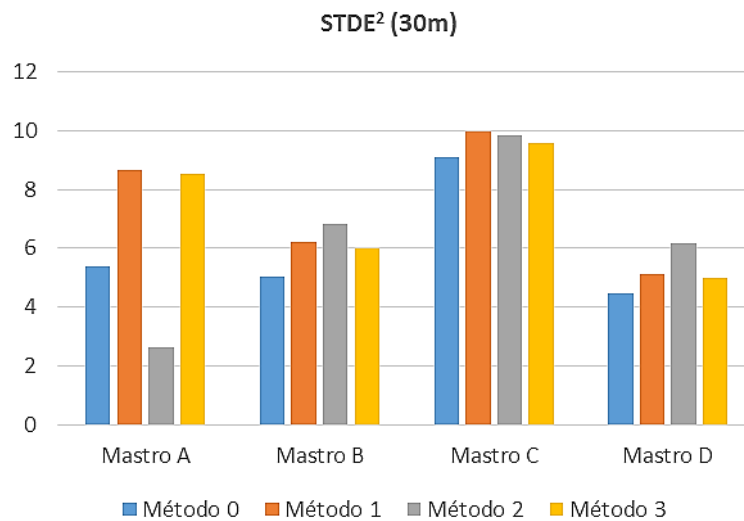


**Figura 6:**  $RMSE^2$  para cada mastro de cada método a 60 m de altura. Unidades do quadrado do RMSE,  $(m/s)^2$ .

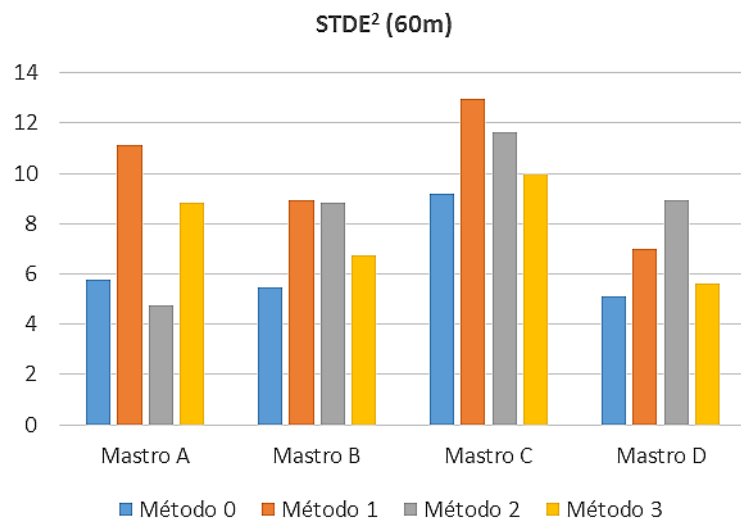
As figuras 7 e 8 são referentes ao  $STDE^2$ , e demonstram que o mastro C é o mastro com maior valor, tanto a 30 m de altura como a 60 m, em todos os métodos. O método com maior valor de  $STDE^2$  para o mastro C é o método 1, tanto a 30 m como a 60 m de altura.

Dos quatro métodos, o método com menor valor de  $STDE^2$  é o método 2 e é referente ao mastro A.

Para o mastro B, C e D, o método com menor valor de  $STDE^2$  para ambas as alturas é o método 0.



**Figura 7:** STDE<sup>2</sup> para cada mastro de cada método a 30 m de altura. Unidades do quadrado do STDE, (m/s)<sup>2</sup>.



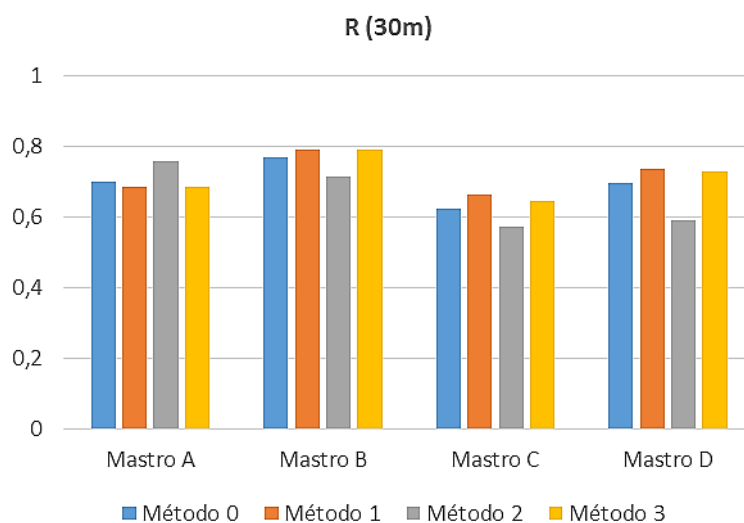
**Figura 8:** STDE<sup>2</sup> para cada mastro de cada método a 60 m de altura. Unidades do quadrado do STDE, (m/s)<sup>2</sup>.

Sobre o coeficiente de correlação, R, podemos verificar pelas figuras 9 e 10, que os valores se situam no intervalo de 0,5 a 0,81.

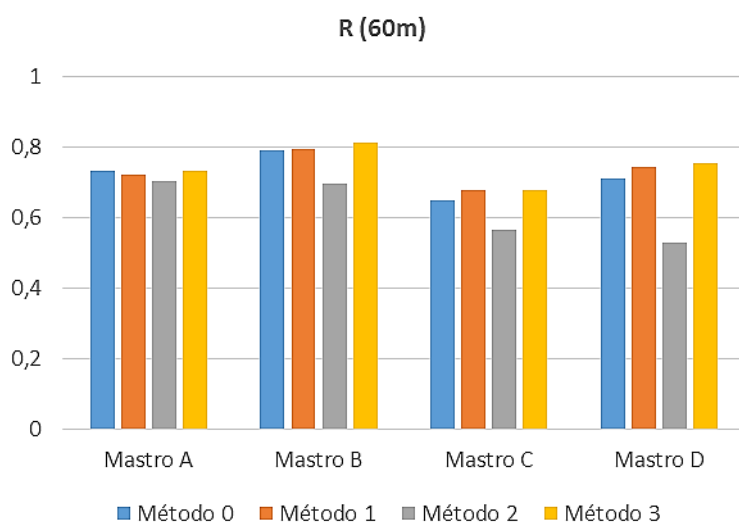
Os gráficos do coeficiente de correlação, para ambas as alturas, demonstram que o mastro B, pelos métodos 0,1 e 3, é o que apresenta maiores valores. Indicando melhor correlação. Já pelo método 2, o mastro A é o que obtém melhor coeficiente de correlação.

Na figura 9, referente ao coeficiente de correlação a 30 m de altura, verifica-se que o mastro C é o mastro com pior correlação em todos os métodos.

Na figura 10, verifica-se que a altura de 60 m o mastro C é o que apresenta pior correlação pelos métodos 0,1 e 3. Enquanto pelo método 2 o que apresenta pior correlação é o mastro D.



**Figura 9:** Coeficiente de correlação para cada mastro de cada método a 30 m de altura.



**Figura 10:** Coeficiente de correlação para cada mastro de cada método a 60 m de altura.

#### 4.2. Altura de 30 e 60 m

Em análise ao  $BIAS^2$ , a diferentes alturas, verifica-se que pelo método 0 o mastro A e C apresentam maiores valores de  $BIAS^2$  a altura de 30 m do que a 60 m. Os outros dois mastros, B e D, aumentam ligeiramente com a altura.

Para os quatro mastros, a 60 m de altura, pelo método 1 verifica-se que os valores do  $BIAS^2$ , são superiores do que para a altura de 30 m.

Em relação ao  $BIAS^2$ , pelo método 2, verifica-se um aumento no mastro A e D com a altura, enquanto no mastro B e C uma diminuição com a altura. De salientar que neste método os valores encontram-se muito próximo de zero, exceto o mastro C a 30 m de altura, e o mastro D a 60 m de altura.

O mastro A e D, pelo método 3, apresentam uma diminuição do valor de  $BIAS^2$  com a altura, já os mastros B e C é o inverso.

Relativamente ao  $RMSE^2$ , pelo método 0, podemos afirmar que o valor do  $RMSE^2$  do mastro A e C diminuiu com a altura, e do mastro B e D aumentou.

O valor de  $RMSE^2$ , pelo método 1 e 2, para todos os mastros, aumentou consideravelmente com a altura, exceto o mastro C pelo método 2, que praticamente se manteve igual.

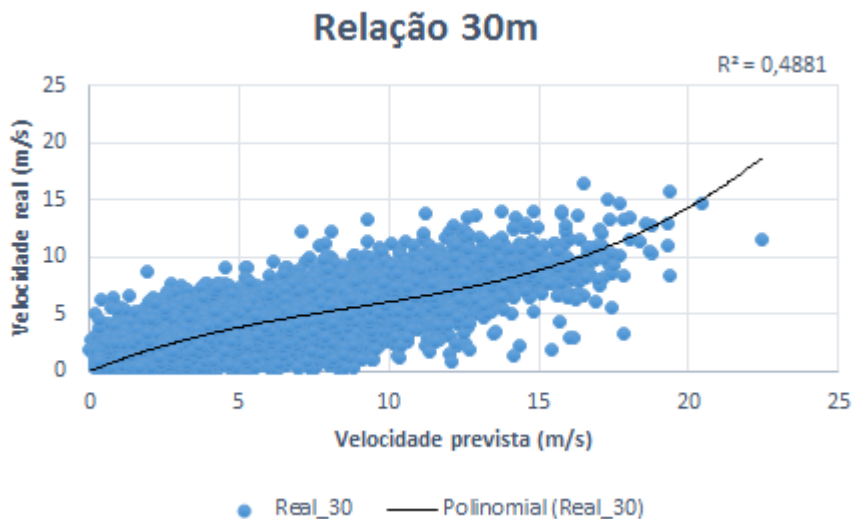
O mastro A, pelo método 3, foi o único mastro, dos quatro, em que o valor do  $RMSE^2$  baixou com o aumento da altura.

Comparando a figura 7 e 8, podemos verificar que o valor do  $STDE^2$  aumentou em todos os mastros e em todos os métodos, com o aumento de altura.

Em relação ao comportamento do coeficiente de correlação com o aumento de altura, verifica-se que pelo método 0, 1 e 3 os mastros apresentam valores iguais ou superiores a altura de 60 m comparativamente a altura de 30 m. Pelo método 2, verifica-se que com o aumento de altura o coeficiente fica igual ou diminui nos quatro mastros.

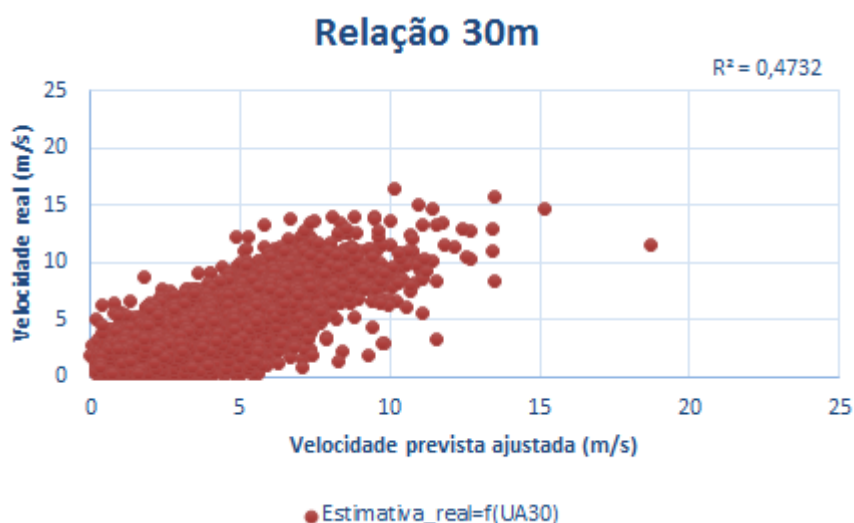
### 4.3. Ajuste

Após a análise dos resultados dos erros, para os vários mastros de cada método a cada altura, foi efetuado um ajuste para aproximar os dados previstos aos medidos e consequentemente diminuir os erros. As figuras seguintes, 11 e 12, demonstram como foi realizado esse ajuste e a diferença do antes e depois do ajuste.



**Figura 11:** Relação velocidade real (medida) em função da velocidade prevista, a 30 m de altura para o Mastro A do método 0.





**Figura 12:** Relação velocidade real (medida) em função da velocidade prevista ajustada, a 30 m de altura para o Mastro A do método 0.

Para a realização do ajuste, foi feita uma relação entre a velocidade real (medida) e a velocidade prevista, para a mesma altura. A partir dessa relação foi encontrada a função de tendência que melhor descreve o comportamento dos dados ( $R^2$  maior). Entre as funções testadas, a função polinomial de terceiro grau que interseca o ponto (0,0) foi a escolhida. Com a função polinomial de terceiro grau foram recalculados os valores da velocidade.

Pela figura 12, em comparação com a figura 11, verificamos que com o ajuste a nuvem de dados fica mais pequena e que a relação entre as velocidades melhora.

Após o ajuste de todos os métodos e mastros, a diferentes alturas para o horizonte temporal D+1, foram recalculados todos os erros, o BIAS, o STDE e o RMSE e coeficiente de correlação.

Como forma de facilitar a comparação entre os erros, foram criados gráficos de comparação de cada método, antes e depois do ajuste.

As tabelas que se seguem são referentes aos quatro métodos depois do ajuste, a diferentes alturas.

**Tabela 10:** Erros e coeficiente de correlação para método 0 com ajuste a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

Método 0 Ajuste				
Altura 30				
	STDE <sup>2</sup>	RMSE <sup>2</sup>	BIAS <sup>2</sup>	R
<b>Mastro A</b>	2,76	2,77	0,00	0,69
<b>Mastro B</b>	4,80	4,82	0,02	0,76
<b>Mastro C</b>	8,38	8,40	0,03	0,62
<b>Mastro D</b>	3,74	3,75	0,01	0,68

**Tabela 11:** Erros e coeficiente de correlação para método 0 com ajuste a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

<b>Método 0 Ajuste</b>				
	<b>Altura 60</b>			
	<b>STDE<sup>2</sup></b>	<b>RMSE<sup>2</sup></b>	<b>BIAS<sup>2</sup></b>	<b>R</b>
<b>Mastro A</b>	3,78	3,78	0,01	0,72
<b>Mastro B</b>	5,26	5,27	0,01	0,78
<b>Mastro C</b>	8,07	8,11	0,04	0,64
<b>Mastro D</b>	4,62	4,63	0,01	0,70

**Tabela 12:** Erros e coeficiente de correlação para método 1 com ajuste a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

<b>Método 1 Ajuste</b>				
	<b>Altura 30</b>			
	<b>STDE<sup>2</sup></b>	<b>RMSE<sup>2</sup></b>	<b>BIAS<sup>2</sup></b>	<b>R</b>
<b>Mastro A</b>	2,92	2,92	0,00	0,67
<b>Mastro B</b>	4,38	4,39	0,01	0,78
<b>Mastro C</b>	7,60	7,64	0,04	0,66
<b>Mastro D</b>	3,27	3,28	0,01	0,73

**Tabela 13:** Erros e coeficiente de correlação para método 1 com ajuste a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

<b>Método 1 Ajuste</b>				
	<b>Altura 60</b>			
	<b>STDE<sup>2</sup></b>	<b>RMSE<sup>2</sup></b>	<b>BIAS<sup>2</sup></b>	<b>R</b>
<b>Mastro A</b>	3,99	4,01	0,02	0,71
<b>Mastro B</b>	5,11	5,12	0,01	0,79
<b>Mastro C</b>	7,61	7,68	0,07	0,67
<b>Mastro D</b>	4,18	4,18	0,00	0,74

**Tabela 14:** Erros e coeficiente de correlação para método 2 com ajuste a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

<b>Método 2 Ajuste</b>				
	<b>Altura 30</b>			
	<b>STDE<sup>2</sup></b>	<b>RMSE<sup>2</sup></b>	<b>BIAS<sup>2</sup></b>	<b>R</b>
<b>Mastro A</b>	2,41	2,43	0,02	0,74
<b>Mastro B</b>	6,03	6,09	0,05	0,70
<b>Mastro C</b>	9,45	9,56	0,11	0,57
<b>Mastro D</b>	4,76	4,77	0,01	0,57

**Tabela 15:** Erros e coeficiente de correlação para método 2 com ajuste a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

<b>Método 2 Ajuste</b>				
	<b>Altura 60</b>			
	<b>STDE<sup>2</sup></b>	<b>RMSE<sup>2</sup></b>	<b>BIAS<sup>2</sup></b>	<b>R</b>
<b>Mastro A</b>	4,42	4,46	0,04	0,68
<b>Mastro B</b>	7,51	7,60	0,09	0,68
<b>Mastro C</b>	9,84	9,96	0,12	0,56
<b>Mastro D</b>	6,86	6,87	0,01	0,51

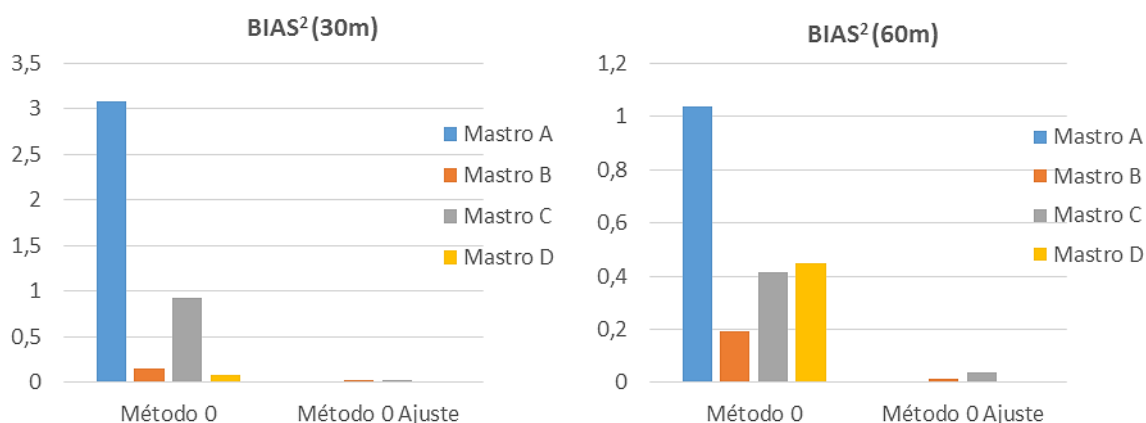
**Tabela 16:** Erros e coeficiente de correlação para método 3 com ajuste a 30 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

<b>Método 3 Ajuste</b>				
	<b>Altura 30</b>			
	<b>STDE<sup>2</sup></b>	<b>RMSE<sup>2</sup></b>	<b>BIAS<sup>2</sup></b>	<b>R</b>
<b>Mastro A</b>	2,89	2,90	0,01	0,67
<b>Mastro B</b>	4,37	4,38	0,01	0,79
<b>Mastro C</b>	7,72	7,75	0,02	0,65
<b>Mastro D</b>	3,36	3,36	0,00	0,72

**Tabela 17:** Erros e coeficiente de correlação para método 3 com ajuste a 60 m de altura. Unidades do quadrado dos erros, (m/s)<sup>2</sup>.

<b>Método 3 Ajuste</b>				
	<b>Altura 60</b>			
	<b>STDE<sup>2</sup></b>	<b>RMSE<sup>2</sup></b>	<b>BIAS<sup>2</sup></b>	<b>R</b>
<b>Mastro A</b>	3,86	3,87	0,02	0,72
<b>Mastro B</b>	4,75	4,77	0,01	0,80
<b>Mastro C</b>	7,47	7,52	0,04	0,67
<b>Mastro D</b>	4,05	4,06	0,01	0,75

Visto que com o ajuste, os dados melhoraram de uma forma geral, vai ser analisado unicamente de forma gráfica o mastro A do método 0, mas foram analisados de igual forma os restantes métodos e mastros. Os gráficos do BIAS<sup>2</sup>, STDE<sup>2</sup>, RMSE<sup>2</sup> e o coeficiente de correlação estão representados nas figuras seguintes e são gráficos de comparação entre o método, antes e depois do ajuste, para cada altura.



**Figura 13:** BIAS<sup>2</sup> do método 0 para os quatro mastros a diferentes alturas, sem e com ajuste, respetivamente. Unidades do quadrado do BIAS, (m/s)<sup>2</sup>.

A figura 13 mostra que, para o método 0, tanto a altura de 30 m como de 60 m, o BIAS<sup>2</sup> diminui praticamente para o valor zero com o ajuste, como esperado.

Sendo que, com o ajuste, o mastro D a 60 m de altura é o que apresenta ligeiramente um maior BIAS<sup>2</sup>, enquanto que antes do ajuste o que apresentava maior BIAS<sup>2</sup> era o mastro A.

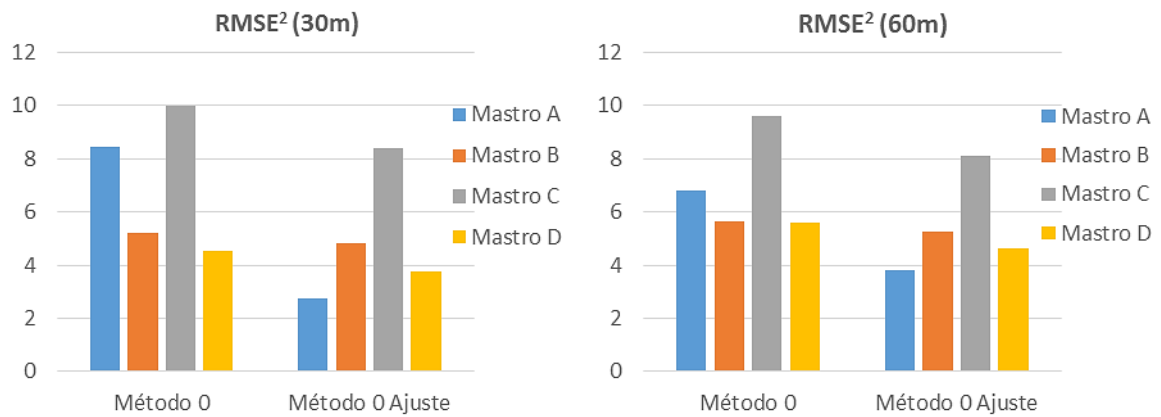
Relativamente ao RMSE<sup>2</sup> pelo método 0, podemos verificar pela figura 14 que em ambas as alturas o RMSE<sup>2</sup> diminui com o ajuste em todos os mastros. Verifica-se ainda que os mastros A e C apresentam maior descida do valor de RMSE<sup>2</sup>.

Pelo método 0, o mastro A foi o que obteve o valor de RMSE<sup>2</sup> mais baixo depois do ajuste. Podemos afirmar que pelo método 0 o mastro A é o que apresenta, depois do ajuste, melhor previsão.

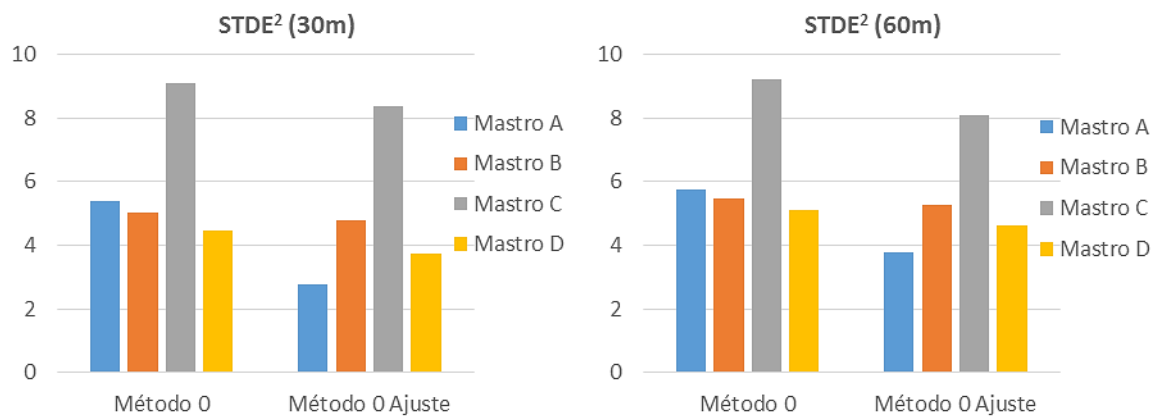
Em relação ao STDE<sup>2</sup>, figura 15, verifica-se que com o ajuste houve uma diminuição dos valores, à semelhança do que ocorreu no RMSE<sup>2</sup>, sendo que o mastro A passou a ser o mastro com valor mais baixo, enquanto que antes do ajuste era o mastro D.

Sobre o coeficiente de correlação dos quatro mastros para o método 0, verifica-se, pela figura 16, que praticamente mantiveram-se os mesmos valores com o ajuste. Sendo o mastro B o que melhor coeficiente de correlação apresenta e o mastro C o pior.

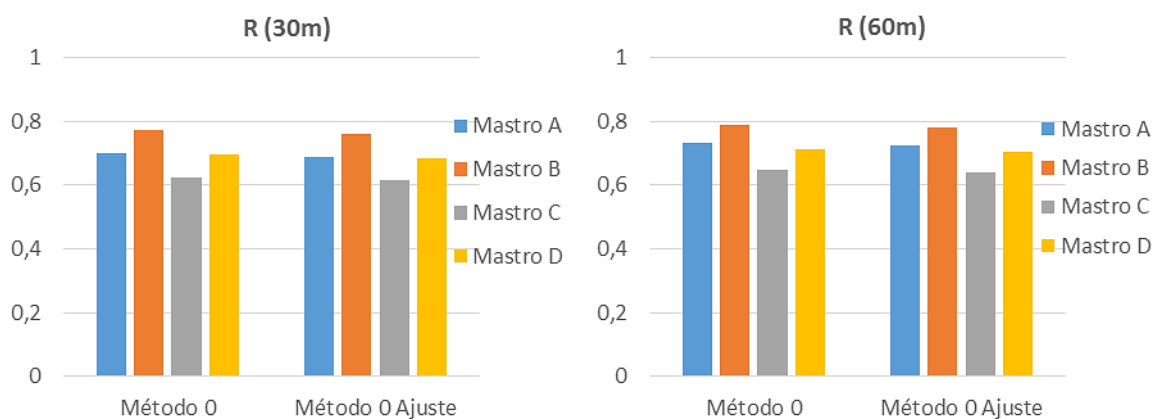
Podemos afirmar que o ajuste realizado ao método 0 foi mais eficaz para o mastro A, devido ao fato de apresentar menores valores de RMSE<sup>2</sup> e STDE<sup>2</sup>.



**Figura 14:**  $RMSE^2$  do método 0 para os quatro mastros a diferentes alturas, sem e com ajuste, respetivamente. Unidades do quadrado do RMSE,  $(m/s)^2$ .



**Figura 15:**  $STDE^2$  do método 0 para os quatro mastros a diferentes alturas, sem e com ajuste, respetivamente. Unidades do quadrado do STDE,  $(m/s)^2$ .



**Figura 16:** Coeficiente correlação do método 0 para os quatro mastros a diferentes alturas, sem e com ajuste, respetivamente.

Em relação ao  $BIAS^2$ , pelo método 1, verifica-se o mesmo comportamento do que pelo método 0. Houve uma diminuição do valor praticamente para zero em todos os mastros.

Pelo método 1, tanto o  $RMSE^2$  como o  $STDE^2$ , com o ajuste, têm uma diminuição dos valores comparativamente com o mesmo método sem ajuste. Sendo o mastro C, em ambas as alturas, o que tem maior valor de  $RMSE^2$  e  $STDE^2$ , já o mastro A foi o mastro que sofreu maior alteração. Antes do ajuste era o que tinha maiores valores e depois do ajuste é o que apresenta valores mais baixos. Também podemos verificar que os valores de  $RMSE^2$  e  $STDE^2$  sofreram uma maior diminuição relativamente ao método 0.

O coeficiente de correlação dos vários mastros, pelo método 1, apresenta um comportamento idêntico aos mastros pelo método 0.

Podemos afirmar que o ajuste realizado ao método 1 foi mais eficaz para o mastro A, devido ao fato de apresentar menores valores de  $RMSE^2$  e  $STDE^2$ .

Sobre o comportamento do  $BIAS^2$ ,  $RMSE^2$  e  $STDE^2$  no método 2, com o ajuste, é de salientar um comportamento idêntico aos métodos 0 e 1. Os valores diminuíram com o ajuste, excepto o  $BIAS$  no mastro B que aumentou ligeiramente.

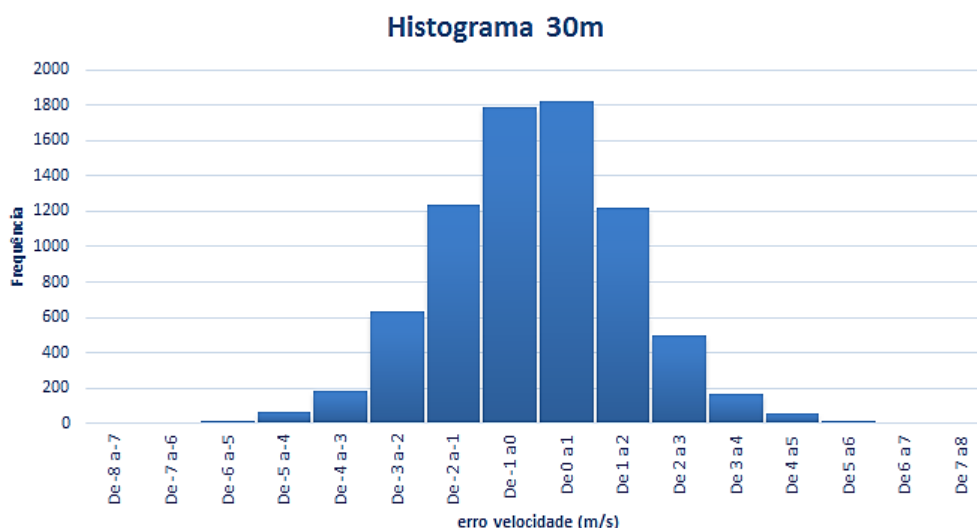
Com o ajuste aplicado ao método 2, o mastro D foi o que melhorou mais o valor de  $RMSE^2$  e  $STDE^2$ , mas o mastro A continuou a ser o mastro com valores mais baixos.

Em relação ao coeficiente de correlação não se verifica grandes alterações, diminuiu ligeiramente o valor com o ajuste.

Pelo método 3, após o ajuste, o  $BIAS^2$  diminui em todos os mastros e em ambas as alturas. O  $RMSE^2$  e o  $STDE^2$  demonstram o mesmo comportamento que os restantes métodos com o ajuste. Diminuíram com o ajuste.

O mastro A, nos métodos 0 e 1, antes do ajuste, era o que tinha maiores valores de  $RMSE^2$  e  $STDE^2$ , e depois do ajuste é o que apresenta menores valores.

Relativamente ao coeficiente de correlação, para o método 3, os valores mantiveram-se praticamente os mesmos com o ajuste.



**Figura 17:** Histograma do erro da velocidade para o mastro A, pelo método 0, a 30 m de altura.

O mastro A, a 30 m de altura, pelo método 0 com o ajuste, é o mastro com menores erros, isto é melhores previsões. Pela figura 17, verificamos que o erro da velocidade tem maior frequência no intervalo de 0 a 1 m/s, tendo o intervalo de -1 a 0 m/s praticamente o mesmo número de frequências.

#### 4.4. Decomposição RMSE

Após toda a análise referente aos erros com o ajuste, foi realizada a decomposição do RMSE, como forma de entender que tipos de erros estavam associados às várias previsões com o ajuste.

As tabelas 18 a 25 são referentes aos termos de composição do RMSE<sup>2</sup> para todos os mastros, para cada método a diferentes alturas.

**Tabela 18:** Termos de composição do RMSE para método 0 com ajuste a 30 m de altura. Unidades, (m/s)<sup>2</sup>.

Método 0 Ajuste						
	Altura 30					
	BIAS <sup>2</sup>	SDBIAS <sup>2</sup>	DISP <sup>2</sup>	R	$\sigma_p$	$\sigma_m$
<b>Mastro A</b>	0,00	0,27	2,49	0,69	1,75	2,28
<b>Mastro B</b>	0,02	0,31	4,50	0,76	2,80	3,35
<b>Mastro C</b>	0,03	0,82	7,55	0,62	2,71	3,62
<b>Mastro D</b>	0,01	0,40	3,34	0,68	2,00	2,63

**Tabela 19:** Termos de composição do RMSE para método 0 com ajuste a 60 m de altura. Unidades, (m/s)<sup>2</sup>.

Método 0 Ajuste						
	Altura 60					
	BIAS <sup>2</sup>	SDBIAS <sup>2</sup>	DISP <sup>2</sup>	R	$\sigma_p$	$\sigma_m$
<b>Mastro A</b>	0,01	0,31	3,47	0,72	2,25	2,80
<b>Mastro B</b>	0,01	0,25	5,01	0,78	3,15	3,64
<b>Mastro C</b>	0,04	0,82	7,25	0,64	2,75	3,66
<b>Mastro D</b>	0,01	0,48	4,14	0,70	2,32	3,01

**Tabela 20:** Termos de composição do RMSE para método 1 com ajuste a 30 m de altura. Unidades, (m/s)<sup>2</sup>.

Método 1 Ajuste						
	Altura 30					
	BIAS <sup>2</sup>	SDBIAS <sup>2</sup>	DISP <sup>2</sup>	R	$\sigma_p$	$\sigma_m$
<b>Mastro A</b>	0,00	0,22	2,70	0,67	1,80	2,28
<b>Mastro B</b>	0,01	0,26	4,12	0,78	2,84	3,35
<b>Mastro C</b>	0,04	0,74	6,86	0,66	2,76	3,62
<b>Mastro D</b>	0,01	0,31	2,96	0,73	2,07	2,63

**Tabela 21:** Termos de composição do RMSE para método 1 com ajuste a 60 m de altura. Unidades,  $(m/s)^2$ .

Método 1 Ajuste						
	Altura 60					
	BIAS <sup>2</sup>	SDBIAS <sup>2</sup>	DISP <sup>2</sup>	R	$\sigma_p$	$\sigma_m$
<b>Mastro A</b>	0,02	0,35	3,64	0,71	2,21	2,80
<b>Mastro B</b>	0,01	0,18	4,93	0,79	3,22	3,64
<b>Mastro C</b>	0,07	0,72	6,88	0,67	2,81	3,66
<b>Mastro D</b>	0,00	0,31	3,86	0,74	2,45	3,01

**Tabela 22:** Termos de composição do RMSE para método 2 com ajuste a 30 m de altura. Unidades,  $(m/s)^2$ .

Método 2 Ajuste						
	Altura 30					
	BIAS <sup>2</sup>	SDBIAS <sup>2</sup>	DISP <sup>2</sup>	R	$\sigma_p$	$\sigma_m$
<b>Mastro A</b>	0,02	0,10	2,31	0,74	1,97	2,28
<b>Mastro B</b>	0,05	0,25	5,78	0,70	2,85	3,35
<b>Mastro C</b>	0,11	0,59	8,86	0,57	2,85	3,62
<b>Mastro D</b>	0,01	0,68	4,09	0,57	1,81	2,63

**Tabela 23:** Termos de composição do RMSE para método 2 com ajuste a 60 m de altura. Unidades,  $(m/s)^2$ .

Método 2 Ajuste						
	Altura 60					
	BIAS <sup>2</sup>	SDBIAS <sup>2</sup>	DISP <sup>2</sup>	R	$\sigma_p$	$\sigma_m$
<b>Mastro A</b>	0,04	0,21	4,21	0,68	2,35	2,80
<b>Mastro B</b>	0,09	0,38	7,13	0,68	3,03	3,64
<b>Mastro C</b>	0,12	0,59	9,25	0,56	2,89	3,66
<b>Mastro D</b>	0,01	1,15	5,71	0,51	1,93	3,01

**Tabela 24:** Termos de composição do RMSE para método 3 com ajuste a 30 m de altura. Unidades,  $(m/s)^2$ .

Método 3 Ajuste						
	Altura 30					
	BIAS <sup>2</sup>	SDBIAS <sup>2</sup>	DISP <sup>2</sup>	R	$\sigma_p$	$\sigma_m$
<b>Mastro A</b>	0,01	0,26	2,64	0,67	1,77	2,28
<b>Mastro B</b>	0,01	0,21	4,16	0,79	2,89	3,35
<b>Mastro C</b>	0,02	0,84	6,89	0,65	2,71	3,62
<b>Mastro D</b>	0,00	0,26	3,10	0,72	2,12	2,63



**Tabela 25:** Termos de composição do RMSE para método 3 com ajuste a 60 m de altura. Unidades, (m/s)<sup>2</sup>.

Método 3 Ajuste						
	Altura 60					
	BIAS <sup>2</sup>	SDBIAS <sup>2</sup>	DISP <sup>2</sup>	R	$\sigma_p$	$\sigma_m$
<b>Mastro A</b>	0,02	0,30	3,55	0,72	2,25	2,80
<b>Mastro B</b>	0,01	0,21	4,55	0,80	3,19	3,64
<b>Mastro C</b>	0,04	0,75	6,72	0,67	2,79	3,66
<b>Mastro D</b>	0,01	0,38	3,67	0,75	2,40	3,01

Analisando as tabelas dos termos de composição do RMSE<sup>2</sup>, verifica-se que o termo que compõe o RMSE<sup>2</sup> com maior valor é o DISP<sup>2</sup>, termo que contribui para os erros de fase.

Relativamente ao DISP<sup>2</sup>, o mastro A, a 30 m de altura, pelo método 2 é o que apresenta menor valor, enquanto pelo método 1 é o que apresenta maior valor. A 60 m de altura o que apresenta menor valor é o método 0 e o maior valor é o método 2.

Para o mastro B, verifica-se que o método 1 é o que tem menor valor de DISP<sup>2</sup> para a altura de 30 m e para a altura de 60 m é o mastro 3, já o que apresenta para ambas alturas maior DISP<sup>2</sup> é o método 2.

Em relação aos restantes mastros, C e D, verifica-se que ambos os mastros para a altura de 30 m têm o método 1 como o método com menor DISP<sup>2</sup>, e o método 2 como o maior, para a altura de 60 m têm o método 3 com o menor DISP<sup>2</sup> e o método 2 com o maior.

Em relação ao comportamento do DISP<sup>2</sup> com a altura, verifica-se que no mastro C pelo método 0 e 3 diminui com maior altura. Nos restantes mastros em todos os métodos ocorre um aumento do DISP<sup>2</sup> com aumento da altura.

Os erros de amplitude são indicados pela soma dos termos BIAS e SDBIAS.

Analisando as tabelas referentes aos termos de decomposição do RMSE, verifica-se que os erros de amplitude são significativamente inferiores em relação aos erros de fase (DISP).

Para o mastro A, a 30 m de altura, o método com maiores erros de amplitude é o método 0 e 3, ambos com o mesmo valor, e o com menor é o método 2. Para a altura de 60 m, o método com maiores erros de amplitude é o método 1, e o com menor é o método 2.

No mastro B, para a altura de 30 m, o método 3 é o que tem menores erros de amplitude, e o método 0 é o que tem maiores. A altura de 60 m, o método 1 é o que tem menores erros de amplitude e o método 2 é o que tem maiores.

No mastro C, a 30 m de altura, o método com maiores erros de amplitude é o método 3 e para a altura de 60 m é o método 0. O método que apresenta menores erros para ambas as alturas é o método 2.

Por fim, para o mastro D a 30 m de altura, o método 2 é o que apresenta maiores erros de amplitude, tanto a 30 como a 60 m. O método que apresenta menores erros de amplitude a 30 m de altura é o método 3, e a altura de 60 m é o método 1.

Comparando os erros de amplitude com o aumento de altura, verifica-se que o mastro A é o único mastro em que os erros de amplitude aumentam com a altura para todos os métodos. No mastro B pelo método 0 e 1, os erros de amplitude diminuem com

o aumento da altura, pelo método 2 aumenta com a altura e pelo método 3 mantém-se com a altura.

No mastro C, os erros de amplitude aumentam com o aumento da altura pelos métodos todos, exceto pelo método 3.

Com o mastro D verifica-se que os erros de amplitude aumentam com o aumento da altura pelos métodos todos, exceto o método 1.

#### 4.5. Predictabilidade de D+1 a D+4

Para estudar os erros de velocidade, à medida que ocorre a evolução de horizontes temporais, D+1 a D+4, foi analisado o comportamento de cada mastro a diferentes alturas pelo método 0, antes e depois do ajuste.

Os valores dos cálculos, antes do ajuste, referentes aos vários mastros são apresentados nas tabelas de 26 a 29.

**Tabela 26:** BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro A. Unidades, (m/s).

Mastro A	Altura 30 m			Altura 60 m		
	BIAS	RMSE	STDE	BIAS	RMSE	STDE
D+1	1,75	2,91	2,32	1,02	2,61	2,40
D+2	1,81	3,05	2,46	1,06	2,79	2,58
D+3	1,78	3,15	2,60	1,04	2,96	2,78
D+4	1,72	3,21	2,71	0,96	3,11	2,96

**Tabela 27:** BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro B. Unidades, (m/s).

Mastro B	Altura 30 m			Altura 60 m		
	BIAS	RMSE	STDE	BIAS	RMSE	STDE
D+1	-0,39	2,28	2,25	-0,44	2,38	2,33
D+2	-0,40	2,46	2,43	-0,44	2,59	2,56
D+3	-0,37	2,62	2,59	-0,41	2,76	2,73
D+4	-0,54	2,89	2,84	-0,59	3,06	3,01

**Tabela 28:** BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro C. Unidades, (m/s).

Mastro C	Altura 30 m			Altura 60 m		
	BIAS	RMSE	STDE	BIAS	RMSE	STDE
D+1	-0,96	3,16	3,01	-0,65	3,10	3,03
D+2	-0,86	3,23	3,12	-0,55	3,24	3,19
D+3	-0,86	3,37	3,26	-0,55	3,37	3,33
D+4	-1,08	3,54	3,37	-0,79	3,53	3,44

**Tabela 29:** BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro D. Unidades, (m/s).

Mastro D	Altura 30 m			Altura 60 m		
	BIAS	RMSE	STDE	BIAS	RMSE	STDE
D+1	-0,30	2,13	2,11	-0,67	2,36	2,26
D+2	-0,23	2,37	2,36	-0,60	2,61	2,54
D+3	-0,31	2,67	2,65	-0,70	2,95	2,87
D+4	-0,34	2,78	2,76	-0,72	3,09	3,01

Relativamente aos resultados do mastro A, para a altura de 30 m, verifica-se que em relação ao RMSE e STDE, ocorre um aumento à medida que se passa do horizonte D+1 até ao D+4. O RMSE tem valores ligeiramente superiores ao STDE.

No caso do BIAS, apresenta um valor maior para o horizonte D+2 e inferior para o horizonte D+4.

Para a altura de 60 m, ocorre precisamente o mesmo que para a altura de 30 m, mas com um BIAS e RMSE inferiores em todos os horizontes. Já o STDE apresenta valores superiores a altura de 60 m do que a 30 m.

Com isto, podemos afirmar que quanto maior a altura menor serão os erros para o mastro A.

O BIAS tem valor positivo, o que indica que as previsões tendem a sobrestimar os valores observados.

Para o mastro B verifica-se que tanto a 30 m de altura como a 60 m, o RMSE e STDE aumentam à medida que se passa dos horizontes D+1 até ao D+4, sendo estes superiores à altura de 60 m.

Relativamente ao BIAS, verificam-se valores absolutos menores para o horizonte D+3 em ambas as alturas, sendo o BIAS inferior a altura de 30 m.

O BIAS, no mastro B, ao contrário do mastro A, apresenta valores negativos, indicando que as previsões tendem a subestimar os valores observados.

No mastro C, verifica-se que ocorre um aumento do RMSE e STDE ao longo dos horizontes para ambas as alturas, sendo que o valor do RMSE a altura de 60 m no horizonte D+1 é inferior ao da altura a 30 m e os restantes praticamente iguais em ambas as alturas.

Os valores de STDE aumentam ligeiramente com a altura.

Sobre o BIAS, é de constatar valores absolutos superiores para a altura de 30 m, sendo os horizontes D+1 e D+4 os que possuem maiores valores. BIAS com valores negativos, as previsões tendem a subestimar os valores observados.

No mastro D, em ambas as alturas, o RMSE e o STDE aumentam ao longo dos horizontes (de D+1 a D+4) e são superiores a altura de 60 m.

Em relação ao BIAS, podemos afirmar que em valores absolutos são superiores a altura de 60 m. Sendo o horizonte D+2 o menor valor absoluto de BIAS. BIAS com valores negativos indicam que as previsões tendem a subestimar os valores observados.

Em forma de síntese, o mastro C, em ambas alturas, é o que apresenta maiores valores de RMSE e STDE, comparativamente aos restantes mastros. O mastro D a 30 m de altura é o que tem menor valor de RMSE.

Em todos os mastros o STDE aumenta com a altura, enquanto o RMSE diminui com a altura no mastro A e aumenta no mastro B e D.

O mastro C é o que pior previsão tem, visto que tem maior valor de RMSE. Já o mastro B, a 60 m de altura, é o que tem melhor previsão e o mastro D, a melhor previsão a 30 m de altura, ao longo dos horizontes temporais.

Dos quatro mastros, o mastro A e C são os que apresentam maiores valores de RMSE para a altura de 30 m, do que para a altura de 60 m.

Em relação ao BIAS, verifica-se uma diferença do mastro A relativamente aos restantes, este apresenta valores positivos. É o único mastro com uma previsão a sobrestimar os valores observados.

Os valores dos cálculos, depois do ajuste, referentes aos vários mastros são apresentados nas tabelas de 30 a 33.

**Tabela 30:** BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro A, com ajuste. Unidades, (m/s).

Ajuste						
	Altura 30 m			Altura 60 m		
Mastro A	BIAS	RMSE	STDE	BIAS	RMSE	STDE
D+1	-0,07	1,66	1,66	-0,08	1,95	1,94
D+2	-0,12	1,79	1,79	-0,13	2,11	2,11
D+3	-0,11	1,91	1,90	-0,14	2,28	2,28
D+4	-0,11	2,01	2,00	-0,12	2,43	2,43

**Tabela 31:** BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro B, com ajuste. Unidades, (m/s).

Ajuste						
	Altura 30 m			Altura 60 m		
Mastro B	BIAS	RMSE	STDE	BIAS	RMSE	STDE
D+1	-0,15	2,20	2,19	-0,12	2,30	2,29
D+2	-0,13	2,36	2,36	-0,12	2,49	2,49
D+3	-0,17	2,50	2,49	-0,16	2,64	2,64
D+4	-0,16	2,72	2,71	-0,16	2,90	2,89

**Tabela 32:** BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro C, com ajuste. Unidades, (m/s).

Ajuste						
	Altura 30 m			Altura 60 m		
Mastro C	BIAS	RMSE	STDE	BIAS	RMSE	STDE
D+1	-0,17	2,90	2,89	-0,19	2,85	2,84
D+2	-0,24	3,00	2,99	-0,26	2,98	2,97
D+3	-0,25	3,11	3,10	-0,25	3,09	3,08
D+4	-0,27	3,19	3,19	-0,25	3,20	3,19

**Tabela 33:** BIAS, RMSE e STDE a diferentes alturas e Horizontes para o mastro D, com ajuste. Unidades, (m/s).

Ajuste						
Mastro D	Altura 30 m			Altura 60 m		
	BIAS	RMSE	STDE	BIAS	RMSE	STDE
D+1	-0,08	1,94	1,93	-0,08	2,15	2,15
D+2	-0,07	2,07	2,07	-0,06	2,33	2,33
D+3	-0,11	2,27	2,27	-0,11	2,57	2,57
D+4	-0,08	2,41	2,41	-0,14	2,73	2,73

Pelas tabelas referentes ao método 0, com ajuste, para os vários mastros a diferentes alturas, verifica-se que em todos os mastros o BIAS é negativo. O que quer dizer que, depois do ajuste, as previsões tendem a subestimar os valores observados, em todos os horizontes temporais.

O RMSE e o STDE aumentam ligeiramente à medida que ocorre evolução temporal, isto é passagem do horizonte temporal D+1 a D+4, para todos os mastros.

O único mastro em que o RMSE e o STDE diminuem de forma insignificante com a altura, em todos os horizontes, exceto o D+4, é o mastro C.

Comparando os dados, antes e depois do ajuste, verifica-se que relativamente à predictabilidade de D+1 a D+4 os valores do BIAS, do RMSE e do STDE diminuíram em todos os mastros e alturas para todos os horizontes. Outra alteração com o ajuste foi o RMSE e o STDE, para todos os horizontes, apresentarem valores praticamente iguais, enquanto antes do ajuste, apresentavam uma ligeira diferença.

Antes do ajuste e depois do ajuste o mastro C é o que apresenta maiores erros de previsão em todos os horizontes temporais. Com o ajuste, o mastro A a 30 m de altura, passou a ser o mastro com menores erros, enquanto sem o ajuste era o mastro D a 30 m de altura. Toda esta análise é referente somente ao método 0, visto ser o único método para o qual tenho dados para os diferentes horizontes.



## 5. Conclusões e Trabalho Futuro

Após analisados os resultados dos erros,  $BIAS^2$ ,  $STDE^2$ ,  $RMSE^2$  e o coeficiente de correlação para os quatro métodos de *downscaling*, e sabendo que quanto mais próximo de zero for o  $RMSE$ , melhor será a previsão, posto isso, podemos concluir, antes do ajuste, que o método 2 é o método que melhor prevê o mastro A, o método 3 é o que melhor prevê o mastro C e o método 0 é o que melhor prevê o mastro B e D, para a altura de 30 m.

Relativamente a altura de 60 m, conclui-se que para o mastro A, o método 2 é o que apresenta menor valor de  $RMSE^2$ , sendo o método 2 o que melhor o prevê. Para os restantes mastros, o método que melhor prevê é o método 0.

Sobre o método 0 podemos afirmar que o valor do  $RMSE^2$  do mastro A e C diminuiu com a altura, portanto as previsões são melhores a maior altura, já o mastro B e D aumentou, as previsões são melhores para menor altura.

No método 1 e 2, o valor de  $RMSE^2$  de todos os mastros aumentou consideravelmente com a altura, exceto o mastro C pelo método 2, que praticamente se mantém igual. Conclui-se que o método 1 e 2 têm melhor previsão a menor altura, exceto o mastro C pelo método 2 em que a previsão é igual em ambas as alturas.

O mastro A pelo método 3 foi o único mastro, dos quatro, em que o valor do  $RMSE^2$  baixou com o aumento da altura, apresentando assim melhor previsão a 60 m de altura do que a 30 m.

Sobre o  $STDE^2$ , verifica-se que o seu valor aumentou em todos os mastros e em todos os métodos com o aumento de altura.

Em relação ao comportamento do coeficiente de correlação com o aumento de altura, verifica-se que no método 0, 1 e 3 os mastros apresentam valores iguais ou ligeiramente superiores a altura de 60 m, comparativamente a altura de 30 m. No método 2, verifica-se que com o aumento de altura o coeficiente fica igual ou diminui de forma insignificante nos quatro mastros.

Após a realização do ajuste, para aproximar os dados previstos aos medidos e consequentemente obter diminuição dos erros, foram novamente calculados os erros já anteriormente calculados sem o ajuste.

Comparando os métodos, para todos os mastros, conclui-se que, tanto à altura de 30 m como de 60 m, o  $BIAS^2$  diminui praticamente para o valor zero com o ajuste, o que era esperado. Excepto no mastro B, método 2, que aumentou ligeiramente, tendo este antes do ajuste já valor próximo de zero.

Em todos os métodos, os valores de  $RMSE^2$  e  $STDE^2$  para todos os mastros e em ambas alturas diminuíram com o ajuste.

Relativamente ao  $RMSE$  do método 0 verifica-se que com o ajuste, os mastros A e C apresentam maior descida do valor de  $RMSE^2$ . O mastro A foi o que obteve o valor de  $RMSE^2$  mais baixo depois do ajuste.

Podemos concluir que pelo método 0, o mastro A é o que apresenta depois do ajuste, melhor previsão, menor valor de  $RMSE^2$ . Em relação ao  $STDE^2$ , verifica-se que com o ajuste houve uma diminuição dos valores, à semelhança do que ocorreu no  $RMSE^2$ , sendo

que o mastro A passou a ser o com valor mais baixo, enquanto antes do ajuste era o mastro D.

Podemos afirmar que o ajuste realizado ao método 0 foi mais eficaz para o mastro A, devido ao fato de apresentar menores valores de  $RMSE^2$  e  $STDE^2$

No método 1, o mastro C em ambas as alturas é o mastro com maior valor de  $RMSE^2$  e  $STDE^2$ , já o mastro A foi o mastro que sofreu maior alteração. Antes do ajuste era o que tinha maiores valores e depois do ajuste é o que apresenta valores mais baixos.

Também podemos verificar que os valores de  $RMSE^2$  e  $STDE^2$  sofreram uma maior diminuição relativamente ao método 0.

Podemos afirmar que o ajuste realizado ao método 1 foi mais eficaz para o mastro A, devido ao fato de apresentar menores valores de  $RMSE^2$  e  $STDE^2$ .

Com o ajuste aplicado ao método 2, o mastro D foi o que diminuiu mais o valor de  $RMSE^2$  e  $STDE^2$ , mas o mastro A continuou a ser o mastro com valores mais baixos.

O mastro A pelo método 3, como nos métodos 0 e 1, antes do ajuste, era o que tinha maiores valores de  $RMSE^2$  e  $STDE^2$ , e depois do ajuste é o que apresenta menores valores.

Sobre o coeficiente de correlação dos quatro mastros, em ambas as alturas para todos os métodos, verifica-se que com o ajuste, os valores mantiveram-se ou diminuíram insignificativamente. Sendo o mastro B, para o método 0, 1 e 3 o mastro com melhor coeficiente de correlação e o mastro C o pior. Em todos os métodos, exceto o método 2 o coeficiente de correlação aumenta com a altura.

Em síntese, antes do ajuste, para o método 0, a previsão para o mastro A e C melhora com a altura, já os mastros B e D piora. No método 1, 2 e 3 a previsão piora com a altura, exceto o mastro A no método 3.

Verifica-se que os erros diminuem com o ajuste, melhorando as previsões. Para o mastro A, a 30 m de altura, o método 2 é a melhor simulação, a 60 m de altura é o método 0. Para o mastro B o melhor método é o método 3 em ambas alturas. Relativamente ao mastro C e D, verifica-se que para a altura de 30 m o método 1 é o melhor, e para a altura de 60 m, o melhor método é o 3.

O mastro A, em ambas as alturas, é o mastro com melhores resultados em todos os métodos. Sendo o método 2 para o mastro A, o método com menores erros.

Os erros com maior contribuição, depois do ajuste, existentes em todos os métodos para todos os mastros a diferentes alturas, são erros de fase. Sendo que os erros de amplitude são significativamente pequenos em relação aos erros de fase.

O método 1 para o mastro B, C e D, a 30 m de altura, é o que apresenta menores erros de fase, e o método 2 é o que apresenta maiores erros de fase.

A 60 m de altura, o método 2 é o que contem maiores erros de fase para os mastros B, C e D, e o método 3 é o que apresenta menores erros de fase.

Relativamente ao mastro A, a 30 m de altura, o método 2 é o que apresenta menores erros de fase, já o método 1 é o que apresenta maiores. A 60 m de altura o método 0 é o método com menores erros de fase para o mastro A, e o método 2 o com maiores erros de fase.

Em conclusão à análise da predictabilidade dos horizontes, podemos afirmar que os erros aumentam ligeiramente à medida que ocorre evolução dos horizontes temporais, D+1 a D+4.



Os erros diminuíram depois de aplicar o ajuste.

Com o ajuste, os valores de  $STDE^2$  em todos os métodos para cada mastro são aproximadamente iguais aos valores de  $RMSE^2$ .

De acordo com a equação (14), os erros são elevados.

Como podemos verificar pela tabela 34, não existe um método que seja considerado o melhor para todos os mastros a diferentes alturas.

Como trabalho futuro, poder-se-á propor o estudo da aplicação de outros tipos de ajuste, bem como fazer a validação para outros locais noutras regiões com características diferentes. Outra possibilidade é fazer a análise por tipo de regime meteorológico.

**Tabela 34:** Melhor método (indicado com 'V') para cada mastro a cada altura, após o ajuste.

Mastro	Altura 30 m				Altura 60 m			
	Mét. 0	Mét. 1	Mét. 2	Mét. 3	Mét. 0	Mét. 1	Mét. 2	Mét. 3
A			V		V			
B				V				V
C		V						V
D		V						V



## 6. Bibliografia

- [1] Melo, Francisca - *Prospecção de ventos para geração eoliétrica utilizando modelo atmosférico de mesoescala*. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas) - Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia. Fortaleza, 2011. 95p.
- [2] Costa, Paulo - *Atlas do potencial eólico para Portugal continental*. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra) - Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa. Lisboa, Junho 2004. 131p.
- [3] Oliveira, Luciana - *Regras e boas práticas para instalação de torres anemométricas voltadas para estudo de potencial eólico*. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Abril 2011. 101p.
- [4] Carvalho, David - *Optimização do modelo numérico de previsão do tempo WRF no contexto de previsão e produção de energia eólica*. Dissertação (Mestrado em Meteorologia e Oceanografia Física) – Universidade de Aveiro. Aveiro, 2009. 50p.
- [5] Maria, Paulo; Costa, Alexandre; Sombra, Sérgio - *Simulação de ventos em alta resolução no litoral do Ceará*. Disponível em: <http://www.cbmet.com/cbm-files/14-f67bf807c58e4b3b283c414f55b9de4b.pdf>
- [6] W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers, *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*, National Center for Atmospheric Research Technical Note, NCAR, Boulder, 2008. Disponível na internet: [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v3.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf)
- [7] Hutchinson, T. A., Sousounis, P., Marshall, S. – *WRF enhancements for operational simulations*. WRFMM5 User's Workshop. Junho 2005. Disponível em: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2005/abstracts/Session2/2-Hutchinson.pdf>
- [8] Soares, Carina - *Validação de Estimativas do Recurso Eólico Obtidas com o Modelo Numérico WRF*. Dissertação (Mestrado em Meteorologia e Oceanografia Física) – Universidade de Aveiro. Aveiro, 2010. 50p.
- [9] Santiago, Alexandre – *Simulação da camada limite planetária sobre a região metropolitana da Grande Vitória com o uso do modelo de mesoescala WRF*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiente) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009. p. 16-28

- [10] Lange, Matthias - *On the Uncertainty of Wind Power Predictions—Analysis of the Forecast Accuracy and Statistical Distribution of Errors*. ForWind-Centre for Wind Energy Research, University of Oldenburg. DOI: 10.1115/1.1862266
- [11] *The FirstLook Global Wind Dataset: Annual Mean Validation*, 3TIER, Janeiro 2009. Disponível em: [http://www.3tier.com/static/ttcms/us/documents/publications/3TIER\\_WP\\_FL\\_gbl\\_wind\\_validation.pdf](http://www.3tier.com/static/ttcms/us/documents/publications/3TIER_WP_FL_gbl_wind_validation.pdf)
- [12] Moseley, Stephen – *Observations to forecasts -Part 12: Getting the most out of model data*, Weather, Vol. 66, nº10 (Outubro 2011) p.271-276
- [13] Ferreira, António - *Sensibilidade às parametrizações físicas do WRF nas previsões à superfície em Portugal Continental*. Estágio (Meteorologia e Oceanografia Física) – Universidade de Aveiro. Aveiro, Setembro 2007. p.26-36
- [14] Y. Zhang, J. Hemperly, N. Meskhidze and W. Skamarock, *The Global Weather Research and Forecasting (GWRf) Model: Model Evaluation, Sensitivity Study, and Future Year Simulation*, Atmospheric and Climate Sciences, Vol. 2 No. 3, 2012, p. 231-253. DOI: 10.4236/acs.2012.23024.
- [15] “[http://serramar.interagirweb.com.br/images/torre\\_vento1.jpg](http://serramar.interagirweb.com.br/images/torre_vento1.jpg)” [Em linha]. Disponível em: [http://serramar.interagirweb.com.br/images/torre\\_vento1.jpg](http://serramar.interagirweb.com.br/images/torre_vento1.jpg). [Consult.: 10-Set-2013].
- [16] S. A. Hsu, *Verifying Wind Profile Equations Under Hurricane Conditions*, The Open Ocean Engineering Journal, 2011, 4, p.60-64. Disponível em: <http://benthamscience.com/open/tooej/articles/V004/60TOOEJ.pdf>
- [17] A.S. Monin, A.M. Obukhov, *Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere*, Tr. Akad. Nauk SSSR Geophys. Inst. 24(151), 1954, p.163-187.
- [18] P. De Oliveira, G. Fisch - *Efeito da Turbulência na Camada Limite Atmosférica em Áreas de Floresta e Pastagem na Amazônia*, Revista Brasileira de Meteorologia, v.15, n.2, 2000, p39-44.
- [19] T. Luna, A. Rocha, A. C. Carvalho, J. A. Ferreira, J. Sousa, *Modelling the extreme precipitation event over Madeira Island on 20 February 2010*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 2011, p.2437–2452.