



**FRANCISCA  
MONTEIRO VINAGRE**

**VERIFICAÇÃO DA PREVISÃO METEOROLÓGICA  
OBTIDA COM O MODELO WRF NO CONTEXTO DE  
APROVEITAMENTO EÓLICO**



**FRANCISCA  
MONTEIRO VINAGRE**

## **VERIFICAÇÃO DA PREVISÃO METEOROLÓGICA OBTIDA COM O MODELO WRF NO CONTEXTO DE APROVEITAMENTO EÓLICO**

Relatório de Estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Professora Alexandra Monteiro, Investigadora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Apoio Financeiro do FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade (COMPETE2020) e por Fundos Nacionais através da FCT do PTDC no âmbito do Projeto AIRSHIP (PTDC/AAG-MAA/2569/2014 - POCI-01-0145-FEDER-016752)

Cofinanciado por:



Cofinanciado por:



O presente estágio curricular, do qual resultou este relatório, reflete o culminar de um caminho marcante na minha vida acadêmica e um grande passo para o início da minha vida profissional. Comecei este estágio com alguns receios, medos, ansiedades e expectativas que foram ultrapassadas e transformadas ao longo destes 8 meses. Estes sentimentos, por vezes evidenciaram-se como um bloqueio, em certos momentos, e como um fator facilitador, em outros.

Muitas vezes, tive a noção de que, diversos conhecimentos e competências adquiridas no decurso da minha formação acadêmica nem sempre correspondiam exatamente ao que se aplica em contexto de trabalho prático. Contudo, as competências assimiladas ao longo do estágio complementaram essa etapa de aprendizagem, associando a teoria à prática.

Em suma, este estágio mostrou-se motivador e enriquecedor, superando todas as expectativas que tinha inicialmente, ainda assim, com a consciência de que ainda tenho um longo processo de formação e trabalho, um percurso de aquisição de novos conhecimentos e de uma maior experiência profissional.

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha avó pelos valores e ensinamentos que me transmitiram, tornando-me na pessoa que sou hoje.

## **o júri**

Presidente

Prof.<sup>a</sup> Doutora Maria Helena Gomes de Almeida Gonçalves Nadais  
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutora Maria Alexandra Castelo Sobral Monteiro  
Equiparada a Investigadora Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientadora)

Doutora Ana Cristina Caldeira da Silva Gouveia Carvalho  
Investigadora no Swedish Meteorological and Hydrological Institute

## **agradecimentos**

A realização do presente relatório foi conseguida graças ao suporte e cooperação de algumas pessoas e instituições, as quais tenho que exprimir o meu sincero agradecimento.

Primeiramente, agradeço a toda a equipa da *Smartwatt*, em particular a todos os colaboradores com quem tive oportunidade de trabalhar no vetor *Intelligence*, que permitiram tornar este estágio ainda mais único e possível, proporcionando-me experiências enriquecedoras tanto a nível pessoal como a nível profissional.

Quero agradecer especialmente à minha orientadora Professora Alexandra Monteiro e ao meu co-orientador Luís Carvalheiro, por todo o acompanhamento, disponibilidade, ensinamento e aconselhamento que me concederam constantemente para a elaboração de todas as tarefas propostas para este trabalho.

À minha família agradeço pelo apoio incondicional em todos os momentos, por acreditarem sempre em mim e principalmente pelo esforço que fizeram para me manter estes cinco anos neste curso. Graças a eles estou aqui hoje, a terminar uma das grandes etapas da minha vida. Muito obrigada!

Ao Luís Miguel agradeço por toda a paciência e pelo incansável apoio.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos os meus amigos e amigas pelo apoio constante, amizade e por me terem acompanhado ao longo desta etapa académica.

**palavras-chave**

Modelo WRF, modelo numérico, previsão meteorológica, energia eólica, intensidade do vento a 100 metros, desempenho do modelo, parametrização física.

**resumo**

O presente relatório resulta do estágio curricular desenvolvido na empresa *Smartwatt*, particularmente no vetor *Intelligence*.

O estudo realizado visa a verificação da qualidade das previsões meteorológicas do modelo WRF, relativamente à variável meteorológica intensidade do vento a 100 metros, efetuada operacionalmente na empresa, para o contexto de aproveitamento eólico.

Neste caso de estudo, foram realizadas múltiplas simulações para se verificar qual o melhor conjunto de parametrizações a usar no modelo de modo a melhorar o desempenho deste sistema de previsão efetuado na empresa. Esta verificação foi realizada a partir de uma comparação ideal entre os parâmetros simulados e os observados de intensidade de vento para períodos e localizações específicas nas diferentes simulações do modelo. Para este exercício de comparação aferiu-se e quantificou-se um conjunto de métricas de erro, diretamente simples e diretas, que permitiram avaliar os erros associados a cada simulação efetuada.

Os resultados obtidos a partir destas análises permitiram retirar algumas conclusões no que diz respeito ao desempenho do modelo WRF para a previsão da intensidade do vento a 100 metros e, conseqüentemente, tomar decisões relativamente ao que pode ser empregue para melhorar ou tornar mais eficiente o sistema de previsão WRF efetuado operacionalmente na empresa.

**keywords**

WRF model, numerical model, weather forecast, wind energy, wind intensity at 100 meters, model performance, physical parameterization.

**abstract**

This report follows the curricular internship at the company *Smartwatt*, more particularly the study conducted on the vector Intelligence.

This study aims to verify the quality of the weather forecasts as described by the WRF model, concerning the meteorological variable wind intensity to 100 meters, conducted operationally in the company, as an input towards wind energy.

In this case study, multiple simulations were carried out to determine the best set of settings to use in order to improve the performance of this system of prediction made in the company. This verification was performed from a comparison between the simulated and observed parameters of wind intensity for periods and specific locations in the various model simulations. This comparison exercise showed and quantified a set of error metrics directly simple and direct that allowed to evaluate the errors associated with each simulation.

The results obtained from these analyses made it possible to draw some conclusions regarding the performance of the WRF model for the prediction of wind strength at the 100 meters and, consequently, to reach some conclusions on how to enhance and increase the efficacy of the company's forecast system WRF.





# Índice

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2. A empresa <i>Smartwatt</i>.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Serviços de previsão meteorológica da <i>Smartwatt</i> .....</b>	<b>11</b>
3.1 Modelo WRF (Weather Research and Forecasting) .....	13
3.1.1 Descrição do modelo.....	13
3.1.2 Domínio e malha de simulação .....	17
3.1.3 Condições de fronteira .....	19
3.1.4 Nesting.....	20
3.1.5 Parametrizações .....	21
<b>4. Análise/otimização do sistema de previsão WRF .....</b>	<b>29</b>
4.1 Configurações do modelo WRF.....	30
4.2 Descrição dos testes realizados .....	31
4.3 Descrição das métricas de erro associadas .....	36
4.4 Análise e discussão de resultados.....	40
4.5 Resultado do desempenho das simulações testadas .....	47
<b>5. Conclusões e recomendações.....</b>	<b>51</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>57</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>61</b>
Anexo I .....	61
Anexo II .....	65

# Índice de Figuras

Figura 1. Página web da Smartwatt (Smartwatt, 2018). .....	5
Figura 2. Soluções disponibilizadas nos três vetores nos quais a Smartwatt atua. ....	7
Figura 3. Componentes do sistema de modelação WRF (Skamarock et al.,2008).....	14
Figura 4.Sistema de pré processamento (WPS) (NCAR,2015).....	15
Figura 5.Coordenada vertical eta ( $\eta$ ) (Skamarock et al.,2008).....	17
Figura 6. Malha do tipo Arakawa C (Skamarock et al., 2008). ....	18
Figura 7. Representação dos domínios de simulação usados na previsão meteorológica com modelo WRF. ....	31
Figura 8. Representação dos pontos escolhidos para as simulações do modelo WRF..	32
Figura 9. Métrica de erro BIAS calculada para cada simulação. ....	41
Figura 10. Métrica de erro MAE calculada para cada simulação. ....	42
Figura 11.Métrica de erro RMSE calculada para cada simulação. ....	43
Figura 12.Métrica de erro MAPE calculada para cada simulação. ....	44
Figura 13. Métrica de erro NMAPE calculada para cada simulação. ....	45
Figura 14.Métrica de erro r calculada para cada simulação. ....	46
Figura I. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 1 .....	61
Figura II. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 2 .....	61
Figura III. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 4 .....	62
Figura IV. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 5 .....	62
Figura V. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 6 .....	62

Figura VI. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 7 .....	63
Figura VII. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 8 .....	63
Figura VIII. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 9 .....	63
Figura IX. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 10.....	64
Figura X. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 11 .....	64



# Índice de Tabelas

Tabela 1. Classificação das parametrizações e esquemas físicos disponíveis na versão 3 do WRF (NCAR, 2018).....	23
Tabela 2. Síntese das parametrizações utilizadas neste caso de estudo.....	35
Tabela 3. Tabela síntese de descrição das métricas de erro calculadas.....	39
Tabela 4. Valores das médias das métricas de erro calculadas.....	40
Tabela 5. Síntese do desempenho das simulações testadas.....	48
Tabela I. Cálculo do conjunto de métricas de erro para cada ponto escolhido.....	65

# 1.Introdução

O presente relatório, realizado no âmbito da unidade curricular Dissertação/Projeto/Estágio do plano de estudos do último ano do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente na Universidade de Aveiro, surge como um documento final de descrição de todo o trabalho desenvolvido, bem como uma reflexão da experiência vivenciada ao longo do estágio curricular.

O estágio curricular decorreu entre os meses de outubro de 2017 e de junho de 2018 na *Smartwatt-Solutions for Energy Systems, SA*, localizada na cidade do Porto. A *Smartwatt* é uma empresa tecnológica que investe fortemente na inovação, cujo objetivo passa por desenvolver produtos e/ou serviços inovadores na área da energia, apostando em novas oportunidades e no fornecimento de soluções para sistemas de energia. Com o intuito de otimizar o uso dos recursos energéticos existentes, esta empresa atua em três vetores distintos: energias renováveis, eficiência energética e inteligência (Smartwatt, 2015).

O trabalho desenvolvido no âmbito do presente estágio curricular, enquadra-se no vetor *Intelligence* da *Smartwatt*. Neste vetor, a empresa fornece serviços de base meteorológica, baseados em algoritmos de inteligência artificial para vários clientes que operam com energias renováveis, nomeadamente com energia eólica. Esta informação meteorológica é obtida por via do modelo *Weather Research and Forecasting (WRF)*, que se trata de um sistema de modelação numérica da atmosfera desenvolvido para a pesquisa de fenómenos atmosféricos e para a previsão de tempo numa escala mais pequena e consequentemente com maior detalhe e realismo acrescido, a escala regional (Skamarock et al., 2008). Para além deste sistema de modelação numérica meteorológica, a empresa recorre, ainda, a fornecedores externos de dados, possibilitando, se necessário, o estabelecimento de um conjunto de dados meteorológicos para a alimentação dos seus modelos de previsão estatística.

Atualmente, as empresas que operam com energias renováveis, particularmente com energia eólica, necessitam de um conhecimento aprofundado do regime de padrão do

vento presente em determinadas áreas, quer para a monitorização dos parques eólicos atuais, quer para o futuro, na caracterização de possíveis áreas de implementação de novos projetos eólicos. Este desafio é complexo e difícil devido à falta de dados e informação de qualidade disponíveis no que se refere aos regimes de vento. Neste sentido, estas empresas (que operam no mercado de energia eólica) recorrem a dados de previsões meteorológicas, efetuadas operacionalmente por outras empresas, como a *Smartwatt*.

Para fornecer melhores serviços e produtos a estes clientes, a *Smartwatt* necessita de uma otimização do desempenho dos seus sistemas de previsão, surgindo assim o propósito deste estágio.

O trabalho proposto centra-se na verificação da qualidade das previsões meteorológicas do modelo WRF, relativas à variável meteorológica intensidade do vento, efetuadas operacionalmente pela empresa. Esta previsão é realizada para uma intensidade de vento a 100 metros, uma vez que os aerogeradores dos parques eólicos estão colocados a uma altura de 60 ou 85 metros, sendo assim mais correto prever a essa altura de vento do que a uma altura de 10 metros, que é o standard. É de realçar que os aerogeradores são colocados a esta altura para não sofrerem a influência do atrito e para não ocorrer ou ocorrer pouca turbulência, permitindo assim, capturar intensidades de vento superiores e, conseqüentemente, gerar maior quantidade de energia eólica.

Para este exercício de verificação, primeiramente foram definidas e realizadas múltiplas simulações teste e seguidamente comparados resultados de diferentes configurações do modelo para pontos específicos e para períodos de estudo específicos, de modo a selecionar a sua melhor configuração operacional em termos de parametrização física.

Este relatório encontra-se estruturado em cinco capítulos.

No primeiro, de natureza introdutória, é feita uma contextualização de todo o trabalho realizado no decurso do estágio curricular.

O segundo capítulo compreende uma caracterização da entidade de acolhimento onde se realizou o estágio, incluindo uma breve descrição da sua atividade, história, evolução e um retrato dos vetores nos quais a empresa atua, em particular o vetor no qual se realizou o presente trabalho.

O terceiro capítulo aborda os principais serviços de previsão meteorológica da *Smartwatt*, principalmente os serviços de previsão empregues, nomeadamente o modelo WRF, descrevendo-o, avaliando a qualidade das previsões obtidas e demonstrando a sua importância para o trabalho desenvolvido. A descrição do modelo WRF engloba uma descrição detalhada do sistema de aquisição dos dados de inicialização e da estrutura de cálculo realizada, bem como da sua configuração operacional no que diz respeito à configuração dos domínios de simulação e às parametrizações físicas utilizadas.

No quarto capítulo apresenta-se a análise de otimização realizada para um dos sistemas de previsão utilizados pela empresa - modelo WRF. É feita uma descrição detalhada dos testes efetuados para a realização da análise e otimização do desempenho do modelo em questão e uma descrição das métricas de erro empregues para avaliar quantitativamente e testar o desempenho desses testes. Posteriormente, é efetuada uma análise e, conseqüentemente, uma discussão dos resultados obtidos no cálculo dessas métricas de erro.

No quinto e último capítulo deste relatório, é feita uma súmula geral do trabalho efetuado, sendo, igualmente, apresentada uma conclusão que consiste numa reflexão e apreciação global das atividades e respetivos objetivos do trabalho realizado no decurso deste estágio curricular, concluindo com algumas recomendações e sugestões para um trabalho futuro.





## 2. A empresa *Smartwatt*

A *Smartwatt - Solutions for Energy Systems, SA* é uma empresa de serviços com sede social e operacional na cidade do Porto, especializada em desenvolver produtos ou serviços inovadores na área da energia e apostar em novas oportunidades (Smartwatt, 2015).

Seguidamente, na Figura 1 é apresentada a página *web* da empresa.

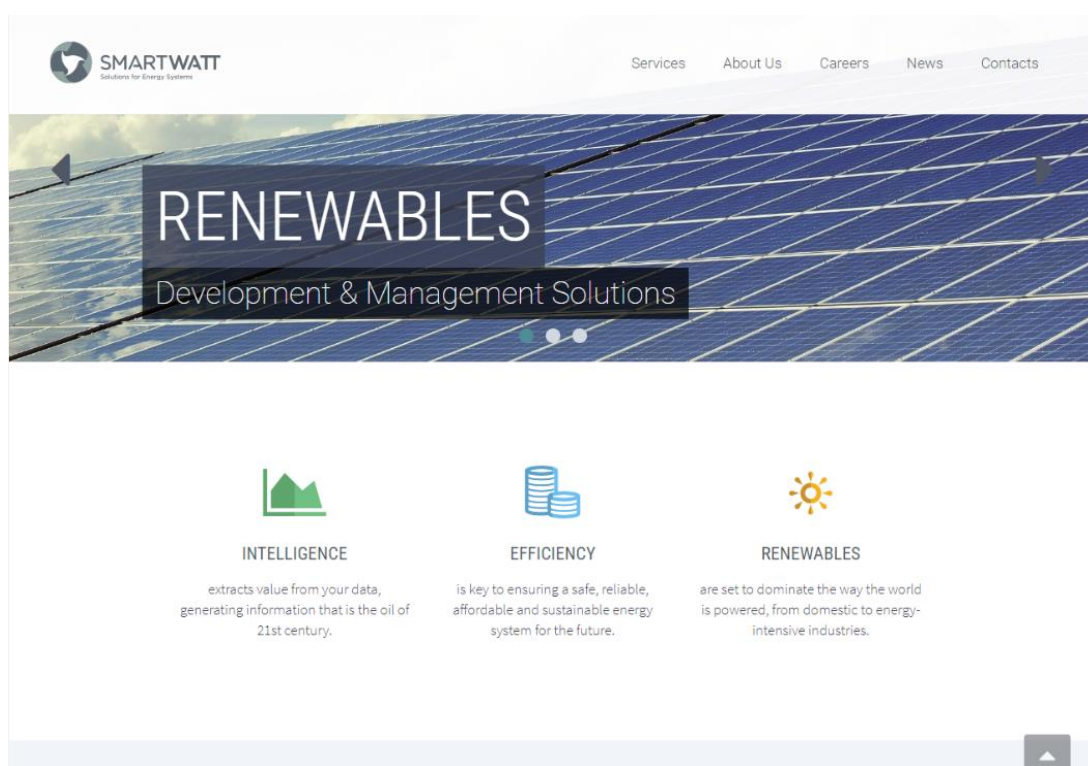


Figura 1. Página *web* da Smartwatt (Smartwatt, 2018).

A empresa foi fundada em 2008, como sendo uma *spin-off* do Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores (INESC) do Porto, caracterizando-se por apresentar uma forte componente de inovação no desenvolvimento de sistemas de inteligência aplicados à energia. A atividade da empresa iniciou-se em 2009, com a participação da Caixa Capital (Grupo Caixa Geral de depósitos), e rapidamente contou com a cooperação de clientes de grande relevância no panorama nacional como a Câmara Municipal de Lisboa, o grupo Cabelte e a Câmara Municipal de Ponte da Barca.

No final de 2010, a participação de capital de Caixa Geral de Depósitos foi adquirida pelo grupo Bongás, tendo em 2012 alcançado o maior capital social da empresa. Em consequência desta aquisição, a empresa sofreu uma ampla alteração nas suas áreas funcionais, passando a apostar em modelos de negócio mais atrativos e diferenciadores, mantendo essa estrutura até à presente data.

Em 2013, o setor no qual a *Smartwatt* atua sofreu efeitos negativos devido à crise macroeconómica e financeira que o país atravessou, levando a que se procedesse a uma reorientação da sua estratégia e estrutura de custos, o que permitiu aumentar as receitas e rentabilidade. Também é importante realçar que, neste mesmo ano (2013) foi aprovado o Sistema de Gestão da Qualidade na empresa, segundo a norma ISO 9001:2008, pelo qual a sua nova realidade se teve que adaptar após uma auditoria de acompanhamento realizada pela Associação Portuguesa de Certificação (APCER).

No ano de 2014, a reestruturação da empresa deu-se por concluída, com o recurso a uma consultora externa e a uma alteração da imagem da empresa. Os investimentos realizados, neste ano, passaram por investimentos na área da consultoria de apoio à definição estratégica da empresa em termos de mercado alvo e respetivos potenciais clientes, bem como uma consultoria para a implementação do processo de saúde e segurança do trabalho no Sistema de Gestão da Qualidade, no âmbito da norma NP4397:2008.

Com o objetivo de se manter atual e competitiva, a *Smartwatt* tem evoluído até à presente data. Atualmente, é uma empresa tecnológica que investe fortemente na área da inovação, atuando como uma Empresa de Serviços de Energia (ESE), dado que a sua atividade se rege pelo fornecimento de soluções inovadoras de *software* e *hardware* para uma melhor gestão e otimização de sistemas energéticos de empresas e de entidades públicas e privadas.

De modo a prestar uma melhor assessoria e melhores serviços, bem como implementar soluções mais eficientes e sustentáveis do ponto de vista económico, adaptadas a cada situação específica, a empresa dispõe de uma abordagem ao mercado por segmento e tipo de cliente, adaptando-se facilmente às necessidades do setor,

especificidades dos processos, tipos de instalações e equipamentos/tecnologias já existentes.

Trabalha também, junto dos seus clientes, no estabelecimento e implementação de estratégias que se propõem à otimização do desempenho energético e do aproveitamento descentralizado de energia, proporcionando assim, um melhor controlo e redução de custos, uma melhoria das condições de conforto, uma racionalização e eficiência energética, ampliando os parâmetros de sustentabilidade e competitividade dentro das organizações, tanto a nível do setor público como do setor privado.

A atividade da *Smartwatt* assenta em três vetores diferentes, energias renováveis, eficiência energética e inteligência, com o objetivo de otimizar o uso de recursos existentes de sistemas de energia, concedendo aos seus clientes ferramentas e estratégias para um melhor controlo e redução de custos, soluções de energia limpa e soluções inteligentes de comunicação e otimização de sistemas de energia (Smartwatt, 2015). A Figura 2 resume as soluções que a *Smartwatt* disponibiliza nos três vetores distintos nos quais atua.

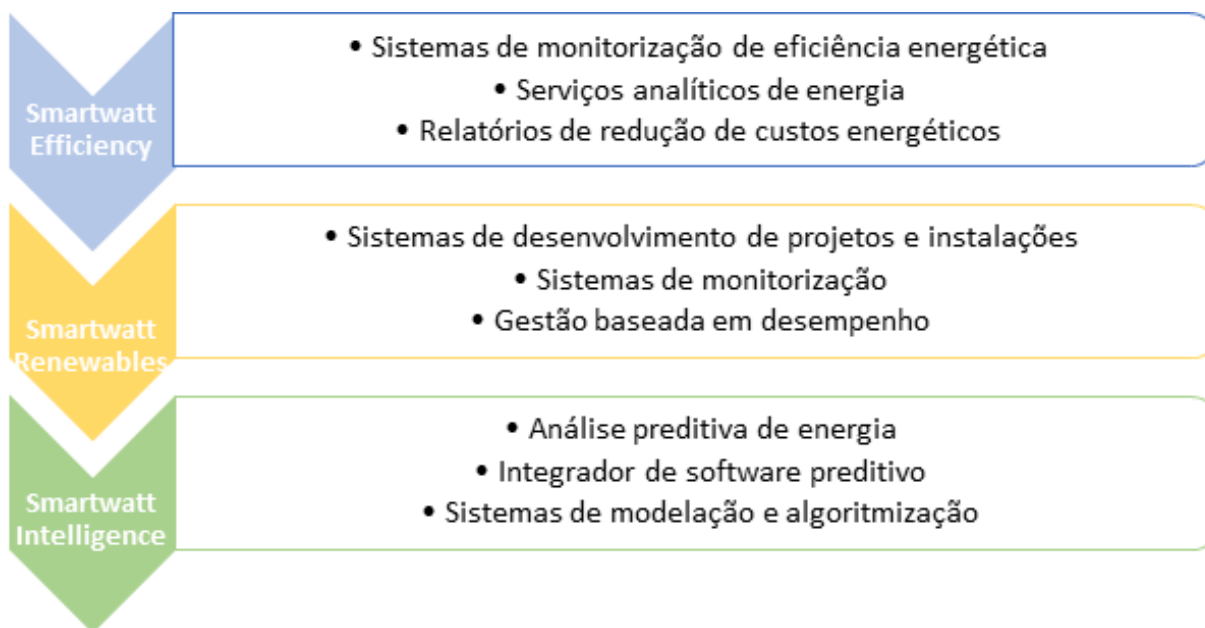


Figura 2. Soluções disponibilizadas nos três vetores nos quais a Smartwatt atua.

No vetor *Efficiency da Smartwatt* desenvolvem-se soluções de *software* abrangente que permitem que as empresas e instituições obtenham melhorias significativas num contexto de eficiência energética, minimizando os impactos ambientais, reduzindo consumos e custos operacionais. Este vetor oferece, também, às empresas e instituições, um conhecimento e flexibilidade operacional que lhes permite tomar as melhores decisões no que diz respeito ao seu desempenho energético, e uma análise detalhada que identifica, quantifica e especifica medidas de redução de custos de energia (Smartwatt, 2018).

No vetor *Renewables da Smartwatt* concebe-se e implementa-se todo o processo de instalação dos sistemas energéticos renováveis, desde o projeto à manutenção, concebendo uma solução que se adapta às necessidades dos seus clientes. Na *Renewables*, também se fornecem soluções que permitem que as empresas e instituições consigam monitorizar as suas instalações de energia renovável em tempo real, bem como um serviço de gestão de todo o processo de instalação possibilitando a maximização do seu desempenho (Smartwatt, 2018).

Por fim, no vetor *Intelligence da Smartwatt* são desenvolvidas ferramentas personalizadas que são posteriormente integradas no sistema dos seus clientes, tornando mais fácil e eficiente o processo de tomada de decisão no que diz respeito ao processo de operação e manutenção dos ativos de energia. A principal vantagem destas ferramentas é permitir o desenvolvimento de algoritmia preditiva para o comportamento de fontes de energia, como a fotovoltaica, a eólica e a hidroelétrica, onde se prevê a sua produção, consumo, preço de energia e também desastres naturais que podem ocorrer e que podem, conseqüentemente, afetar os respetivos ativos de energia e causar incidentes na rede. Neste vetor, também se desenvolvem ferramentas de análise preditiva, que se apresentam facilmente adaptadas a qualquer plataforma de *software*, como um módulo ou complemento ou mesmo uma característica, e ainda, algoritmos customizados que analisam, de forma integrada e automatizada, os dados produzidos pelos sistemas dos seus clientes, fornecendo intuições que ajudem no processo de tomada de decisão para o futuro, tornando as decisões mais adequadas (Smartwatt, 2018). A partir destes algoritmos customizados, a empresa consegue fornecer serviços de base meteorológica, obtida por via de modelos de previsão meteorológica (de que é o WRF é um exemplo), aos seus

clientes que operam com energias renováveis. Neste âmbito, para melhorar os serviços e produtos disponibilizados a esses clientes é necessário que a empresa otimize o desempenho dos seus sistemas de previsão, sendo esse o foco principal do presente trabalho de estágio.

É de salientar, ainda, que a política e estratégia desta empresa tem por base o sucesso que está relacionado com as qualificações dos seus colaboradores e com a interligação entre diversos níveis de conhecimentos, nos três vetores nos quais a sua atividade assenta. O sucesso é fortalecido pela aposta na formação contínua, que promove a constante adaptação às exigências dos vários mercados e permite que os seus colaboradores conheçam a melhor forma de servir os clientes.

A equipa da *Smartwatt* é desta forma multidisciplinar e multitecnológica, com metodologias devidamente estruturadas e baseadas em princípios como a independência e a competência, garantindo assim altos níveis de exigência de qualidade nos serviços prestados.



### **3. Serviços de previsão meteorológica da *Smartwatt***

Em virtude dos diversos avanços científicos, presentemente, é possível simular o comportamento da atmosfera recorrendo a modelos de previsão numérica. Estes modelos de previsão numérica resolvem um sistema complexo e completo de equações matemáticas, nomeadamente de equações dinâmicas e termodinâmicas, fundamentado em leis físicas com o intuito de prever o estado futuro da atmosfera partindo de condições iniciais e condições de fronteira específicas.

O processo de prever rigorosamente o tempo, sobretudo o regime de ventos, permite a obtenção de informações relevantes para diversos setores da sociedade, principalmente para aqueles que se apresentam mais sensíveis a essa variável meteorológica, como por exemplo as empresas que operam com energias eólicas, de modo a que estas possuam um conhecimento aprofundado do regime de padrão de vento presente em determinadas áreas. A possibilidade de prever eventos extremos de vento, por exemplo, permite que sejam tomadas decisões antecipadamente para que os impactos sejam minimizados.

Esta previsão numérica do regime de ventos pode ser realizada a partir de modelos numéricos globais ou regionais. Os modelos numéricos de escala global apesar de conseguirem representar bem a circulação geral atmosférica em sistemas de larga escala, revelam algumas limitações na representação de fenómenos em menor escala, nomeadamente em meso (regional) e microescala. Os fenómenos de microescala ocorrem em escalas muito pequenas, com dimensões espaciais na ordem de 1 metro a 1 km. Nesta categoria estão as nuvens, quando consideradas individualmente, e os fenómenos de turbulência que são bastante afetados pelas características da superfície como as trocas de calor e humidade entre o solo e atmosfera (Law & Coleman, 2015). Os fenómenos de mesoescala ocorrem em dimensões espaciais na ordem de 1 km até cerca de 100 km (Law & Coleman, 2015). Estes apresentam grande relevância para o conhecimento regional do



tempo, e estão ligados às características geográficas das regiões (montanhas, florestas, cidades, proximidade de oceano ou lagos, etc). Temos como exemplo nesta escala, fenómenos como: tornados, tempestades isoladas, linhas de instabilidade, conjunto ou sistemas de nuvens, ilhas de calor e brisas (Parker, 2015).

Os modelos numéricos regionais apresentam uma melhor capacidade para representar fenómenos em menor escala. O principal objetivo destes modelos é resolver explicitamente as equações que regem a dinâmica atmosférica e providenciar simulações precisas aplicando os fatores prognósticos nos pontos de grelha do modelo (Mylonas et al., 2018) Estes implementam dinamicamente o *downscale*, a fim de obter simulações com maior resolução espacial e temporal e de caracterizar com maior detalhe os fatores locais que influenciem a circulação atmosférica, como por exemplo a topografia, as linhas de costa e a cobertura do solo, possibilitando assim simular ou prever com maior pormenor a intensidade do vento. Torna-se crucial que as previsões destes modelos tenham o máximo rigor e fiabilidade de modo a que se apresente como uma ferramenta indispensável e útil à gestão eficiente dos recursos renováveis explorados em certas regiões, neste caso em particular da intensidade do vento a 100 metros (Rodrigues, 2014).

Para obterem as condições iniciais e de fronteira do domínio regional no qual incide a previsão, estes modelos recorrem a resultados de um modelo global, eventualmente integrados com observações de natureza local (Rodrigues, 2014).

Na *Smartwatt*, a previsão numérica de tempo, incluindo variáveis como a intensidade e direção do vento a 100 metros, é realizada à escala regional com recurso a um modelo não hidrostático de previsão numérica de tempo, amplamente utilizado, o modelo *Weather Research and Forecasting (WRF)*, que representa uma ferramenta habilitada a uma boa previsão meteorológica nesta escala (Skamarock et al., 2008). Na maior parte dos casos, estes dados do modelo WRF são usados para alimentar ferramentas de previsão estatística.

A empresa recorre, ainda, a fornecedores de dados externos para obter fontes adicionais de informação, que pode usar para a criação de pequenos *ensembles* de previsão, de forma a otimizar o seu processo de previsão estatística.

De seguida é descrito, com detalhe, a formulação do modelo WRF usado para a previsão meteorológica efetuada na *Smartwatt*.

## **3.1 Modelo WRF (Weather Research and Forecasting)**

### **3.1.1 Descrição do modelo**

O modelo numérico WRF representa um sistema integrado de modelação numérica da atmosfera adequado para a previsão operacional do tempo, assim como para a pesquisa de fenómenos atmosféricos de microescala e mesoescala (Skamarock et al., 2008).

O desenvolvimento deste modelo foi tornado possível graças à parceria entre os centros de investigação e as agências governamentais, nomeadamente a *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), a *National Oceanic and Atmospheric Administration*, os *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), o *Forecast Systems Laboratory* (FSL), a *Air Force Weather Agency* (AFWA), o *Naval Research Laboratory*, *Oklahoma University* e a *Federal Aviation Administration* (FAA), com a cooperação de inúmeras universidades e departamentos de investigação distribuídos por todo o mundo. O intuito destas agências e institutos assenta no desenvolvimento de modelos de mesoescala de previsão de tempo e o aumento da transferência de avanços científicos para fins operacionais (Skamarock et al., 2008).

Este sistema de modelação atmosférica encontra-se em constante desenvolvimento, o que possibilita a melhoria da capacidade de simulação de fenómenos atmosféricos, a partir da assimilação de dados resultantes de observações (ou simulações de outros modelos) (NCAR, 2018).

Em todo o mundo, este modelo é empregue por instituições públicas e privadas como uma ferramenta vantajosa, flexível e eficaz para a simulação de condições atmosféricas idealizadas bem como para situações reais, em escalas horizontais que podem variar desde alguns metros a vários quilómetros (Skamarock et al., 2008).

A estrutura do sistema de modelação WRF é constituído por distintos componentes, representados na Figura 3. O *framework* do *software* WRF inclui a infraestrutura que engloba os *cores* dinâmicos, os pacotes de física que interagem com os *cores*, os programas de inicialização, os programas de análise variacional (WRF-Var), que são responsáveis pela assimilação de dados de observação ou de outros modelos, e pacotes adicionais (opcionais), como o WRF-Chem (Skamarock et al., 2008), por exemplo. No entanto, destaca-se o sistema de pré-processamento (WPS) e o *core* dinâmico, onde são resolvidas as equações físicas que descrevem o comportamento da atmosfera.

Na Figura 3, são representadas as componentes da estrutura do sistema de modelação WRF.

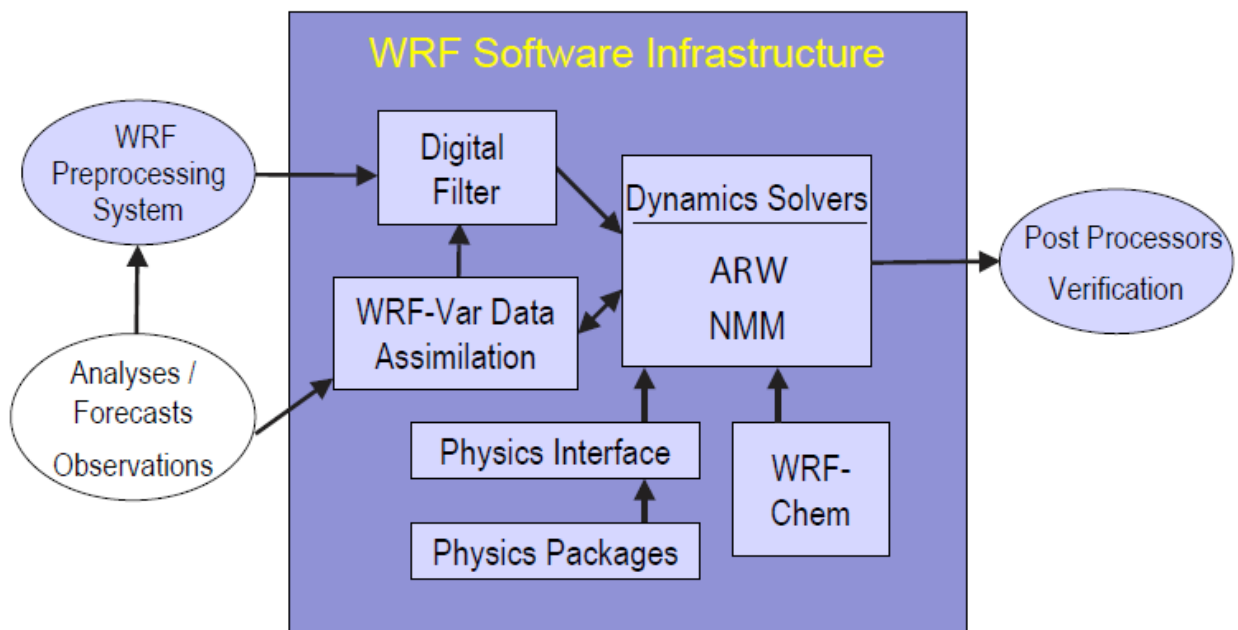


Figura 3. Componentes da estrutura do sistema de modelação WRF (Skamarock et al., 2008).

O WPS, representado na Figura 4, é o ponto de partida para a iniciação de qualquer simulação baseada em condições reais, uma vez que tem como função a definição da localização e resolução do domínio a usar na simulação, a geração de mapas de dados estáticos (tipos de solo, topografia, vegetação, entre outros) e ainda a interpolação das condições de fronteira para todos os pontos da malha, de acordo com a resolução escolhida. Deste modo, o sistema de pré-processamento integra um conjunto de três

subsistemas, em que cada um cumpre uma finalidade: o *geogrid*, define os domínios de simulação conforme uma dada projeção e interpola um conjunto de dados de inicialização para a malha computacional definida, o *ungrib*, descodifica os dados e escolhe os campos de interesse a extrair dos dados atmosféricos iniciais, especificamente oriundos de outros modelos, geralmente de escalas globais, e, por fim, o *metgrid*, interpola horizontalmente os dados obtidos no programa *ungrib* sobre os domínios de integração definidos no *geogrid* (NCAR, 2015).

Após este processo, os dados são processados pelo “*real*”, sendo efetuada a interpolação vertical e criados os ficheiros de inicialização que permitem que o núcleo dinâmico do WRF processe a simulação (Silva & Fisch, 2014).

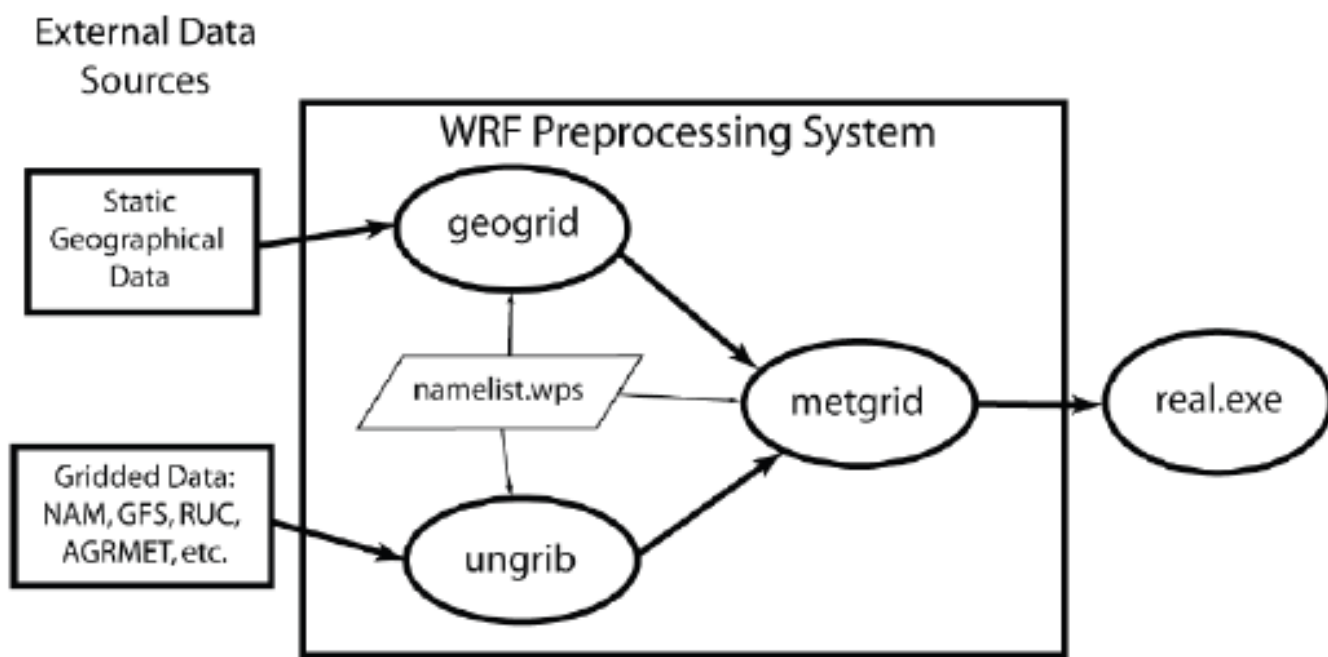


Figura 4. Sistema de pré processamento (WPS) (NCAR, 2015).

O cerne (*core*) de qualquer modelo numérico de simulação hidrodinâmico traduz-se pela formulação das equações dinâmicas necessárias, juntamente com as técnicas empregues na resolução numérica das mesmas. O WRF inclui dois *cores* dinâmicos de processamento distintos quanto à formulação das equações dinâmicas, às variáveis de prognóstico empregues, à forma como se apresentam dispostas na malha e ao método de

integração temporal, respetivamente o *Advanced Research WRF* (ARW), desenvolvido pelo MM5 ( *Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model*), mantido pelo NCAR, que utiliza um esquema de divisão do incremento de integração para ondas acústicas e gravíticas provenientes do modelo de nuvens de *Klemp-Whilhelmsen*, e o NMM ( *Nonhydrostatic Mesoscale Model*), que é um modelo não hidrostático desenvolvido pelo NCEP através do modelo hidrostático ETA (Skamarock et al., 2008).

O *core* dinâmico ARW realiza o processamento efetivo dos dados. Este resolve numericamente as equações Eulerianas não hidrostáticas, numa atmosfera compressível, através da utilização de um esquema *time-split* de Runge-Kutta de terceira ordem (Skamarock & Klemp, 2008).

As equações não hidrostáticas resolvidas no ARW seguem um modelo de terreno, composto por vários níveis de pressão (Figura 5). Estas são fundidas num fluxo (conservador) onde a coordenada vertical, denotada por  $\eta$ , esta, é definida por uma pressão hidrostática normalizada, através da expressão seguinte (Skamarock & Klemp, 2008):

$$\eta = \frac{Ph - P_{hs}}{P_{hs} - P_{ht}} \quad (3.1)$$

Na equação anterior,  $Ph$  corresponde à componente hidrostática de pressão,  $P_{hs}$  à pressão hidrostática nos limites da superfície e  $P_{ht}$  à pressão hidrostática no topo do domínio. Na prática, define-se o  $P_{ht}$  constante (nas configurações do modelo) e a coordenada  $\eta$  diminui regularmente de um valor de 1 na superfície a 0 no limite superior do domínio do modelo definido (Skamarock & Klemp, 2008).

Na Figura 5, são representados os vários níveis de pressão da coordenada vertical  $\eta$ .

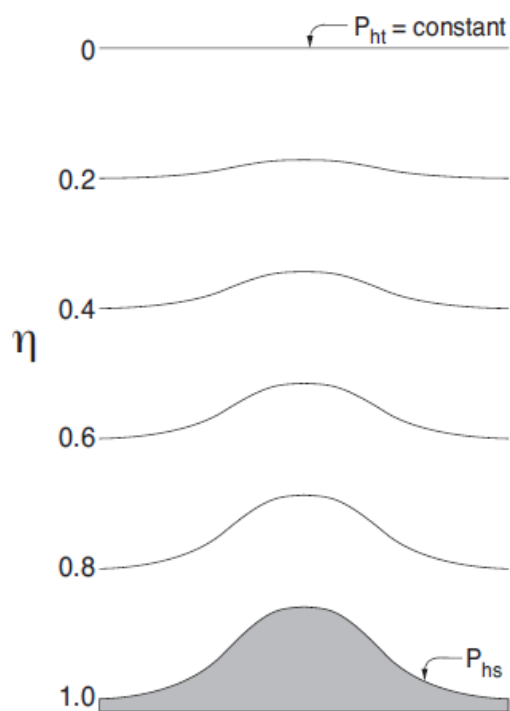


Figura 5. Coordenada vertical eta ( $\eta$ ) (Skamarock et al., 2008).

### 3.1.2 Domínio e malha de simulação

No modelo WRF, a configuração dos domínios de simulação, isto é, o espaço físico representado a partir de uma malha tridimensional no espaço de cálculo, é efetuado com o *geogrid*.

A dimensão do domínio é determinada pelo espaçamento da malha e pelo número de nós de cada domínio e a sua discretização espacial é realizada através do recurso a malhas desfasadas no espaço, do tipo Arakawa C, nas quais as componentes  $u$ ,  $v$  e  $w$  do vento, como mostra a Figura 6, são definidas nos limites da malha, ao passo que as variáveis termodinâmicas são definidas no centro da malha.

Na figura seguinte (Figura 6), está representada a malha do tipo Arakawa C.

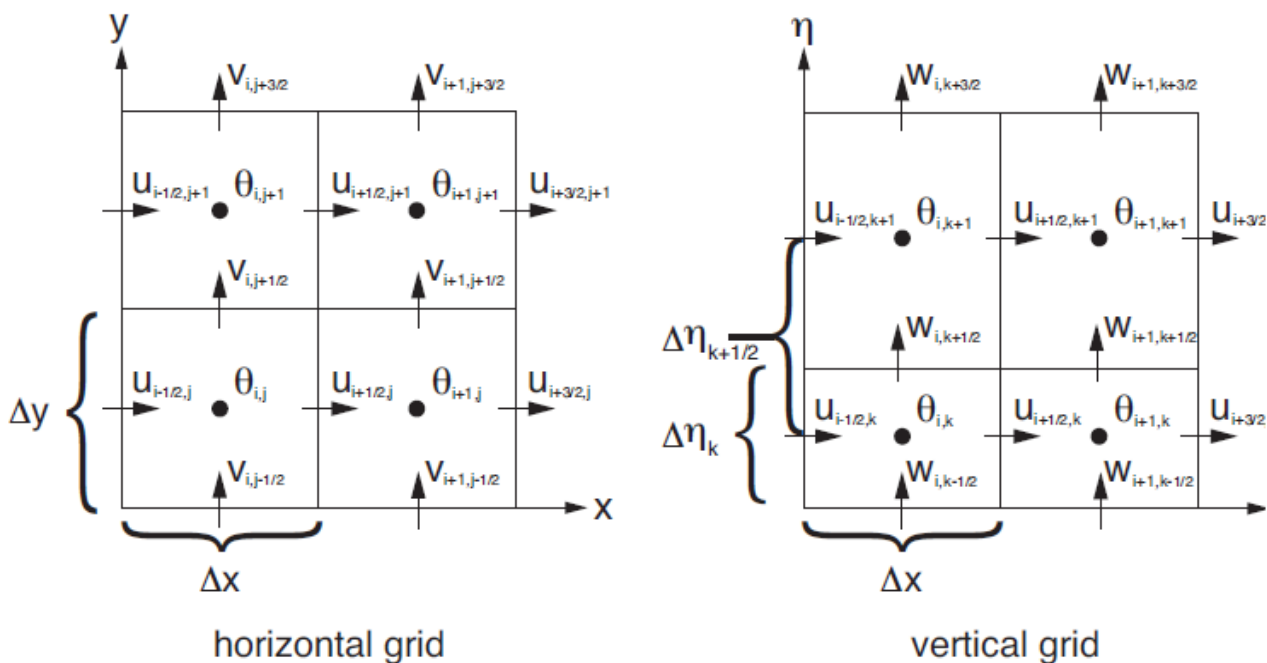


Figura 6. Malha do tipo Arakawa C (Skamarock et al., 2008).

O domínio a simular pelo modelo compreende várias camadas verticais que representam os níveis da atmosfera e a sua superfície é dividida em malhas de caixas horizontais separadas por linhas idênticas às linhas de longitude e latitude, levando a que a região esteja coberta por uma malha tridimensional (Figura 6) (Carvalho, 2009).

O WRF suporta três projeções cartográficas particulares, que dependem das latitudes que se consideram: Cônica Conforme de Lambert, Mercator e Polar Estereográfica (Carvalho, 2009).

O espaçamento da malha depende do número de nós que determinam as suas dimensões. O posicionamento da malha no globo terrestre pode ser estabelecido relativamente ao centro geométrico ou a outro ponto à escolha, sendo definido pelas coordenadas de latitude e longitude. Estas coordenadas corresponderão ao centro do domínio principal, sendo que os domínios posteriores serão posicionados em relação ao canto inferior do domínio que o antecede (Carvalho, 2009).

Qualquer uma das projeções cartográficas, consideradas anteriormente, para diminuir a variação latitudinal do módulo de deformação linear da projeção, podem ser

afinadas para a região varrida pela malha, perante a atribuição das latitudes dos paralelos isométricos. A escolha destas, prende-se, à partida, com a representação gráfica do *output* das variáveis do modelo e também com o próprio *output* em domínios mais extensos (Carvalho, 2009).

### 3.1.3 Condições de fronteira

Nas situações reais, nomeadamente na previsão diária do tempo e na simulação do tempo passado, o modelo WRF para alcançar uma boa qualidade de previsão, carece de condições de fronteira laterais que caracterizem e representem, na medida do possível, o estado real da atmosfera durante o período de previsão meteorológica. Estas condições são adquiridas a partir de um modelo de previsão meteorológica numérica à escala global, que estuda todo o globo, nomeadamente o *Global Forecast System (GFS)* (NOAA, 2014). Estes modelos globais de previsão são operados geralmente por grandes centros de investigação meteorológicos ou por institutos de meteorologia, sendo capazes de fornecer previsões para diversos dias num prazo bastante curto de modo a permitir o avanço das previsões dos modelos de área limitada (escala menor) (NOAA, 2014).

O estado inicial é adquirido através da interpolação espacial dos dados de análise do modelo global, sobre os nós que contornam a malha e nos sucessivos incrementos de tempo de integração. Inicialmente, no WPS é efetuada uma interpolação horizontal das variáveis meteorológicas (vento, temperatura, altura geopotencial, razão de mistura) em cada nível isobárico, e das variáveis de superfície (pressão atmosférica e temperatura) e dos níveis do subsolo (humidade e temperatura). Posteriormente, no bloco de inicialização do *core ARW* é realizada uma interpolação vertical, com a coordenada  $\eta$  em vez de pressão, apropriada à grelha de cálculo do modelo (Carvalho, 2009).

Para otimizar o cálculo do estado inicial, o desempenho do WRF pode ser melhorado a partir de um sistema de assimilação variacional dos dados observados, o pacote WRF-Var, incluído na versão atual do modelo. No entanto, é de referir que se o



prognóstico for a previsão a assimilação variacional não é possível, só no caso de simulações de períodos baseados.

### 3.1.4 Nesting

Este modelo permite, ainda, o aninhamento (*nesting*) de um domínio mais pequeno, com uma malha mais fina, no interior de um domínio com uma malha mais larga, no qual as condições de fronteira do domínio interior provêm do domínio principal (Michalakes et al., 2004). O domínio aninhado (*nest*) opera em *downscaling* gradual, permitindo refinar a solução para uma área limitada sem qualquer custo computacional relativamente ao recurso a uma malha fina em todo o domínio (Carvalho, 2009).

Qualquer *nest* pode funcionar como um domínio principal no que se refere a um domínio ainda mais pequeno, sendo que o único requisito imposto será que os *nest* apresentem os lados alinhados pela malha mais larga e os cantos coincidentes com os nós da mesma (Carvalho, 2009).

O *nesting* pode ocorrer de duas formas, dependente do modo como a malha mais larga e a mais fina interagem, denominados de *one-way-nesting* e de *two-way-nesting*. Em ambos os casos, as condições de fronteira são interpoladas da mesma forma, da malha mais larga para a mais fina. O *one-way-nesting* ocorre quando o *nest* acontece sem retorno de informação para fora dele, juntamente com o domínio principal, enquanto que o *two-way-nesting* funciona de forma contrária: o *nest* transmite a informação do seu estado atual a todos os nós da malha maior coincidentes com os nós da malha inferior (Michalakes et al., 2004).

O *input* dos valores iniciais do *nest* pode ser realizado de três formas opcionais:

- 1) os dados 3D atmosféricos e os dados estáticos (orografia e outros parâmetros fisiográficos) são interpolados nos vértices da grelha do *nest* a partir da grelha do domínio principal. Neste caso, não se consegue tirar partido da orografia e dos outros aspetos fisiográficos inerentes à malha mais fina;

- 2) o *nest* tem uma inicialização própria para todos os campos. Neste caso, não é possível iniciar o *nesting* numa hora posterior à hora 0 da corrida do domínio principal;
- 3) os dados meteorológicos são interpolados através da grelha do domínio principal, enquanto todos os outros resultam da inicialização própria do *nest*.

### 3.1.5 Parametrizações

No modelo WRF está disponível uma larga gama de esquemas que representam aproximadamente processos físicos e dinâmicos.

Os processos físicos com significado meteorológico incluem: a microfísica das nuvens; as trocas radiativas no ar, nas nuvens e na superfície; os mecanismos de atrito turbulento junto à superfície; os processos de convecção térmica e forçada de vento na troposfera; as trocas turbulentas de calor e de vapor de água entre a superfície e a camada de atrito, no interior da camada limite<sup>1</sup>; as trocas de calor por condução e trocas de humidade; e por fim, a evaporação, a evapotranspiração e a condensação de água relativa à formação de nevoeiro, neblina e geada (Carvalho, 2009).

Muitos destes processos físicos, em virtude da sua natureza microscópica e descontínua, não são considerados na dinâmica de fluidos. Noutros casos, as escalas destes processos são inferiores à malha empregue ou às malhas que possuem uma solução numérica complexa e não podem ser representados pelas leis hidrodinâmicas na sua forma fundamental. Para além disso, nenhum destes processos pode ser resolvido pelas equações dinâmicas de um modelo numérico dinâmico, sendo designados de processos de subgrelha, necessitando de ser parametrizados.

---

<sup>1</sup> Região da atmosfera situada mais próxima da superfície terrestre, onde as partículas suspensas e gases são dispersos pelo vento médio (responsável pelo transporte global) e pela turbulência (responsável pela difusão). É a única camada influenciada pela presença da superfície terrestre, nomeadamente pelo arraste, evaporação e transpiração, modificações do escoamento induzidas pelo terreno, emissão de poluentes, entre outros.

As parametrizações físicas tratam-se de modelos específicos que expressam os processos de subgrelha em função das variáveis de prognóstico que entram nas equações dinâmicas, permitindo a análise mais consistente deste tipo de fenômenos e da sua resolução numérica. O seu efeito leva a alteração dos valores atuais destas variáveis, ou das suas tendências, a intervalos de tempo regulares, não tendo que ser necessariamente coincidentes com o elemento de integração das equações dinâmicas. Estas parametrizações encontram-se na vanguarda no que diz respeito à simulação de fenômenos de tempo, ainda que o modelo numérico se alicerce no seu *core* dinâmico (Carvalho, 2009).

Consoante as particularidades da região em estudo existem variadas parametrizações disponíveis e cada uma tem especificações e adequações próprias (Silva & Fisch, 2014). Estas são agrupadas em cinco módulos separados e classificados de acordo com a sua função (Tabela 1), sendo os seguintes: Microfísica (MF), Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO), Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO), Camada de Superfície (CS), Camada Limite Planetária (CLP), Modelo de Superfície de Solo (MSS) e Parametrização de *Cumulus* (PC) (Skamarock et al., 2008).

Dentro de cada parametrização, o modelo WRF oferece variados esquemas físicos alternativos que podem ser combinados de diferentes maneiras e permitem ao utilizador escolher qual utilizar (Tabela 2). Estes esquemas alternativos normalmente variam de simples e eficientes a sofisticados e mais computacionalmente dispendiosos (Carbonell et al., 2013).

Além dos que foram criados de raiz, um conjunto alargado destes esquemas alternativos provêm de modelos anteriores, climatológicos ou de previsão de tempo em escala global ou em mesoescala, de forma a agrupar no mesmo sistema de modelação outras parametrizações físicas com bons resultados noutros contextos.

Na Tabela 1 apresenta-se a classificação das parametrizações e os esquemas físicos disponíveis na versão 3 do modelo WRF.

Tabela 1. Classificação das parametrizações e esquemas físicos disponíveis na versão 3 do WRF (NCAR, 2018).

<b>Parametrização</b>	<b>Função</b>	<b>Esquemas físicos</b>
Microfísica (MF)	Resolve os processos de condensação e evaporação no ar	<i>Kessler, Purdue-Lin, Thompson, Goddard, WSM3, WSM5, WSM6, Morrison 2-mom, Milbrandt 2-mom, ETA (Ferrier), SBU- YLin, NSSL 2-mom, CAM 5.1, WDM5, WDM6, HUJI SBM</i>
Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO)	Resolve as trocas radiativas de longo comprimento de onda na banda do infravermelho	<i>RRTM, RRTMG, CAM, GDL, New Goddard, FLG, Hekld-Suarez</i>
Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO)	Resolve as trocas radiativas de curto comprimento de onda no visível e na banda do ultravioleta	<i>Dudhia, Goddard, GFDL, RRTMG, FLG, New Goddard, CAM</i>
Camada Limite Planetária (CLP)	Resolve as trocas turbulentas não apenas na camada limite planetária, mas ao longo de toda a coluna vertical do modelo;	<i>YSU, MYJ, MRF, ACM2, TEMF, GBM, GFS, QNSE, MYNN2, MYNN3, UW, BouLac, Shin-hong</i>
Camada à Superfície (CS)	Resolve o atrito e os fluxos de calor, de quantidade de movimento e de vapor de água na camada de atrito, junto ao solo	<i>MM5, ETA, Pleim-xiu, TEMF, Revised MM5</i>
Modelo de Superfície de Solo (MSS)	Resolve as trocas de calor e de água no interior do solo	<i>NOAH, Pleim-xiu, SSiB, CLM4</i>
Parametrização de <i>Cumulus</i> (PC)	Resolve a formação de nuvens de origem convectiva	<i>Kain-Fritsch, Betts-Miller-Jancic (BMJ), Grell-Deveny, Grell-Freitas, Grell-3-Ensemble, Old Simplified Arakawa- Schubert, Tiedtke, Zhang-McFarlane, New SAS, New SAS (HWRF), Old Kain-Fritsch, Multi-scale KF</i>

Os esquemas de parametrização de Microfísica (MF) têm um papel fundamental no que respeita a previsão de gelo e chuva. O esquema *Kessler* corresponde a um modelo simples projetado para a modelação das nuvens sem gelo. O *Purdue-Lin* corresponde a um esquema sofisticado que compreende os processos relativos à formação de gelo e neve, adequado a simulações de alta resolução (NCAR, 2018). O *WSM3* é um esquema simples e eficiente que considera o gelo e a neve, adequado a tamanhos de grelha de mesoescala (NCAR, 2018). O esquema *WSM5* é semelhante ao esquema simples de *WSM3*, no entanto apresenta-se um pouco mais sofisticado, o que permite a existência de água super-resfriada e um gradual derretimento da neve abaixo da camada de derretimento (Skamarock et al., 2008). O esquema *WSM6* compreende gelo, neve e granizo, sendo adequados para simulações de alta resolução. Entre os três esquemas de *WSM*, o *WSM6* é o mais indicado para grelhas à escala da nuvem, considerando a sua eficiência (Skamarock et al., 2008). O esquema *Goddard* inclui processos de gelo, neve e granizo, sendo igualmente adequado para simulações de alta resolução (NCAR, 2018). O *Thompson* é um esquema atualizado, com processos de gelo, neve e granizo, adequado também a simulações de alta resolução e desenvolvido com intuito de melhorar a previsão de eventos de congelamento (NCAR, 2018). O esquema de duplo momento de *Morrison* baseia-se num esquema de microfísica em massa de dois momentos. Este compreende gelo, neve e granizo para simulações à resolução da nuvem (NCAR, 2018). O esquema de duplo momento de *Milbrandt* inclui categorias para granizo, chuva, gelo e neve (NCAR, 2018). O *ETA* trata-se de um esquema simples e eficiente com processos de diagnóstico de fase mista (NCAR, 2018). Os esquemas *WDM5* e *WDM6* compreendem a chuva de duplo momento e nuvens (NCAR, 2018). O esquema *NSSL* é um esquema de dois momentos para gotículas de nuvens, gotas de chuva, cristais de gelo, neve e granizo, destinado a simulações à resolução de nuvem. Este permite prever a densidade média das partículas de granizo e a concentração de núcleos de condensação (NCAR, 2018). Por fim, o *SBU-YLin* é um esquema de cinco classes com intensidade prevista para explicar os processos de fase mista (NCAR, 2018).

Os esquemas de parametrização referentes à radiação (Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO) e Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO)) permitem

considerar um aquecimento atmosférico devido à divergência da superfície do fluxo radiativo e da radiação descendente de longo e curto comprimento de onda. Atualmente, estes esquemas da radiação são esquemas de coluna (unidimensionais), sendo cada coluna tratada de forma independente (Skamarock et al., 2008).

O esquema *RRTM* da parametrização de Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO), retirado do *MM5*, corresponde a um esquema que utiliza modelos de circulação geral e o método de correlação-K para transferência radiativa, permitindo o cálculo de fluxos e taxas de arrefecimento na região dos longos comprimentos de onda (Skamarock et al., 2008). Já o esquema *RRTMG* é uma versão atualizada do *RRTM*. O esquema *CAM* trata-se de um esquema de banda espectral usado no Modelo de Atmosfera da Comunidade (CAM) do NCAR para simulações climáticas (Skamarock et al., 2008). O *GFDL* é um esquema de radiação operacional *Eta* (NCAR, 2018). O *New Goddard* é um esquema eficiente que compreende bandas múltiplas e inclui a camada do ozono (NCAR, 2018). Por fim, o esquema *FLG* compreende bandas múltiplas, efeitos de fração de nuvens e o perfil do ozono (NCAR, 2018).

O esquema *Dudhia* da parametrização de Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO) compreende uma integração descendente simples do fluxo solar, responsável pela dispersão do ar limpo e pela absorção do vapor de água (NCAR, 2018). O *New Goddard* é um esquema eficiente que compreende bandas múltiplas e ozono (NCAR, 2018). O *GFDL* é um esquema de radiação operacional *Eta*, de multi-banda de dois fluxos que considera o ozono em vários perfis climatológicos e os efeitos das nuvens (NCAR, 2018). Por último, o esquema *CAM* constitui um esquema de banda espectral usado no Modelo de Atmosfera da Comunidade (CAM) do NCAR para simulações climáticas. Este tem a capacidade lidar com as propriedades óticas de diversos tipos de aerossóis e de outros marcadores (Skamarock et al., 2008).

Relativamente às parametrizações dos processos da camada limite (Camada Limite Planetária (CPL), Camada à Superfície (CS) e Modelo de Superfície do Solo (MSS)) são aquelas que apresentam maior influência numa simulação precisa do vento próximo da superfície. Estas são analisadas isoladamente pelo modelo WRF, mas as parametrizações

interagem fortemente entre si. Desta forma, a escolha de um esquema físico numa destas parametrizações forçará a escolha dos demais (Carvalho et al., 2012).

Os esquemas da parametrização da Camada Limite Planetária (CLP) desempenham também um papel decisivo na precisão das previsões do vento, uma vez que a sua velocidade varia consoante a estabilidade e instabilidade atmosférica dentro desta camada (Carvalho et al., 2012). O *YSU* é o esquema mais amplamente usado nesta parametrização (Hong et al., 2006). Este corresponde a um esquema de fecho não local de primeira ordem com uma camada de arrastamento explícita e um perfil K parabólico instável na camada mista. É uma complexidade do modelo *CLP MRF*, uma vez que acrescentou o termo explícito para o tratamento da zona de arrastamento e implementou uma modificação no esquema para a camada limite estável (Hong, 2010). Recorre ainda, a termos de contra gradiente para a representação de fluxos e é capaz de estimar a profundidade da camada de mistura. O esquema *MRF* é uma versão mais antiga de *YSU* com um tratamento implícito da camada de arrastamento como parte da camada mista não local (NCAR, 2018). O *MYJ* é operacional do modelo Eta com esquema de fecho de energia cinética turbulenta local e equação prognóstica para a TKE (energia cinética turbulenta). Trata-se de uma parametrização de turbulência na CLP e na atmosfera livre que representa uma implementação não singular do modelo de fecho de turbulência de *Melhor-Yamada 2.5* a partir de todos os regimes de turbulência atmosférica. No que se refere ao esquema *ACM2*, é uma combinação do modelo *ACM*, um modelo transiente simples, oriundo da modificação de um modelo convectivo e de um modelo de difusão (Monforte, 2014). É particularmente eficiente no transporte consistente na CLP de qualquer variável atmosférica. Este dispõe, ainda, de componentes locais e não locais para a mistura vertical descendente e ascendente, respetivamente (Silva & Fisch, 2014). Os esquemas *MYNN2* e *MYNN3* partilham características muito semelhantes. O esquema *MYNN2* é de fecho local de ordem de um e meio e prevê termos TKE (energia cinética turbulenta) da sub-rede (Banks & Baldasano, 2016). O esquema *Boulac* é de ordem um e meio, de fecho local e diagnostica a estatura de CLP como a altura em que o prognóstico de TKE alcança um valor suficientemente pequeno (Banks & Baldasano, 2016). O esquema *QNSE* é de ordem um e meio, de fecho local e tem uma opção de TKE que emprega uma nova teoria para regiões

estavelmente estratificadas (Banks et al., 2016). O esquema *UW* também é de ordem um e meio, de fecho TKE local de um modelo climático, o Modelo Sistema Terrestre Comunitário (CESM) (Gent et al., 2011). Por fim, o esquema *TEMF* é de ordem um e meio, de fecho não local e apresenta uma sub-grelha de variável prognóstica de energia total, além do tipo de fluxo de massa de convecção rasa. Este utiliza também os conceitos de difusividade e fluxo de massa para determinar a mistura vertical (Banks et al., 2016).

Em relação aos esquemas da parametrização da Camada à Superfície (CS), apresentam-se como os principais responsáveis pelo cálculo das velocidades de atrito e coeficientes de transferência, possibilitando o cálculo do calor sensível e fluxos de humidade e das tensões à superfície pelos esquemas de CLP (Skamarock et al., 2008). O esquema *ETA* desta parametrização é baseado na teoria de similaridade de *Monin e Obukhov* e geralmente deve ser usado com o esquema da CLP, *MYJ*, passando a denominar-se de *CS MYJ* (Skamarock et al., 2008). O esquema *MM5* fundamenta-se também na teoria da similaridade de *Monin e Obukhov* e deve ser usado em simultâneo com os esquemas da CLP, *YSU* ou *MRF* (Carvalho et al., 2013). Já o esquema *Pleim-Xiu* também se fundamenta na teoria da similaridade de *Monin e Obukhov* e inclui parametrizações de uma sub-camada viscosa na forma de uma resistência de camada limite quase laminar referente às diferenças na difusividade do calor e de vapor de água (Skamarock et al., 2008).

Os esquemas da parametrização do Modelo de Superfície do Solo (MSS) utilizam as informações atmosféricas fornecidas pelos esquemas de CS, forçamentos radiativos calculados pelos esquemas de radiação e forçamentos de precipitação calculados pelos esquemas de PC e de MF, juntamente com informações internas sobre as variáveis de estado terrestres e as propriedades da superfície terrestre de forma a fornecer fluxos de calor e humidade aos pontos da malha sobre o solo e os pontos da malha sobre a água do mar sob a forma de gelo (Skamarock et al., 2008). O esquema *NOAH* desta parametrização inclui zona radicular, de evapotranspiração, drenagem do solo e escoamento superficial, e considera categorias de vegetação, fração e textura do solo. O esquema refere-se a um código unido para fins operacionais e de investigação, capaz de conceder fluxos de calor latente e sensível para o esquema de parametrização da CLP. Este tem, também, a capacidade de prever a existência de gelo no solo e os impactos de pequenas frações de



cobertura de neve, considerando as propriedades de emissividade da superfície (Skamarock et al., 2008). O esquema *Pleim-Xiu* considera três percursos para os fluxos de humidade: evapotranspiração, evaporação através do solo e evaporação através de áreas molhadas (Skamarock et al., 2008).

Os esquemas da parametrização de *Cumulus* (PC) são os responsáveis por representar os fluxos verticais de correntes ascendentes e descendentes não resolvidas pelo modelo por ocorrerem em escalas menores do espaçamento da grelha aplicada na simulação. Estes correspondem ao conjunto de equações responsáveis pela formação da componente convectiva de precipitação (Skamarock et al., 2008). O esquema *Kain-Fritsch* desta parametrização utiliza um sistema de nuvens simples que incorporam as correntes de humidade ascendentes e descendentes e asseguram a conservação da massa, energia térmica e humidade total (Skamarock et al., 2008). O *Betts-Miller-Jancic* corresponde a um esquema operacional *Eta* (NCAR, 2018), onde a eficiência da nuvem varia consoante a entropia, a temperatura média da nuvem e a respetiva precipitação. O *Grell-Devenyi* é um esquema de multi-fecho (NCAR, 2018). O esquema *Grell-3-Ensemble* é uma versão melhorada do esquema *Grell-Devenyi*, diferenciando-se dos outros ao permitir que efeitos de subsidência sejam espalhados pelas colunas de grelha vizinhas, tornando o método mais adequado para tamanhos de resolução menores que 10 km (Skamarock et al., 2008). Já o *Grell-Freitas* também é uma versão melhorada de *Grell-Devenyi* que tenta suavizar a transição para escalas de resolução de nuvens (NCAR, 2018). O *Old Simplified Arakawa-Schubert* trata-se de um esquema simples de fluxo de massa com um equilíbrio de fecho e com um esquema de mistura superficial (NCAR, 2018). Por fim, o *New SAS (HWRF)* e o *New SAS* tratam-se de novos esquemas de fluxo de massa com profundidade e componentes rasos (NCAR, 2018).

Este detalhe apresentado sobre o conjunto de parametrizações do modelo WRF justifica-se devido ao objetivo do trabalho realizado, que pressupõe o teste destas diferentes parametrizações, e que será discutido nos próximos capítulos.

## 4. Análise/otimização do sistema de previsão WRF

Atualmente devido à natureza complexa da dinâmica da atmosfera, não existem previsões de tempo quantitativamente perfeitas. Por esta razão, para otimizar o sistema de previsão operacional da *Smartwatt* baseado no modelo WRF, o objetivo do presente estágio foi efetuar uma pesquisa sobre as melhores parametrizações a usar que permitam um melhor desempenho do sistema de previsão, realizada a partir de uma comparação ideal entre os parâmetros simulados e os parâmetros observados para a variável meteorológica intensidade do vento a 100 metros, para períodos e localizações específicas.

Neste caso de estudo, tornou-se primordial uma comparação entre os valores observados e os simulados para vários pontos localizados em Portugal Continental, para demonstrar a variação espacial do vento devido à diferença de cotas entre os pontos, uma vez que determinadas áreas podem ser fortemente afetadas pela orografia, solo, vegetação e proximidade a habitações. Por exemplo, encostas mais íngremes ou a proximidade a um grande número de habitações pode levar a ocorrência de ventos menos intensos devido à existência de maior efeito de atrito presente entre a superfície e a massa de ar em movimento.

Assim, para esta avaliação foram realizadas múltiplas simulações, de modo a testar as diferentes configurações do modelo e posteriormente quantificar o erro/incerteza associada, comparando com valores observados em diferentes locais.

Neste exercício de aferição e quantificação do erro foi definido um conjunto de métricas de erro, relativamente diretas e simples, para a avaliação dos erros associados ao processo de simulação, aqui entendidos como a diferença entre valores simulados e valores observados, para a mesma grandeza física, permitindo assim, avaliar o desempenho do modelo nas simulações efetuadas e estimar a probabilidade de acerto das previsões geradas.

Seguidamente são descritos, com detalhe, os vários testes realizados, sendo primeiramente descritas as configurações usadas em cada simulação do modelo WRF.

## 4.1 Configurações do modelo WRF

No presente trabalho, a previsão numérica do vento a 100 metros em diferentes pontos de Portugal Continental foi realizada a partir de simulações teste do modelo WRF na versão 3.8.1. Foi testada também, uma simulação de controlo na versão 3.6.1 do modelo WRF, de modo a replicar o mais possível o que é feito operacionalmente.

As simulações do modelo WRF foram inicializadas recorrendo aos dados do modelo GFS (*Global forecast System*), operadas pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e são realizadas quatro vezes ao dia. Os dados destas previsões são definidos com uma resolução espacial horizontal de 0,25° e 0,5° na simulação de controlo operacional, com horizonte temporal máximo de 240 horas e com 40 níveis verticais desigualmente espaçados, sendo estes dados obtidos diariamente para cada corrida do modelo realizada. Estes arquivos de dados são facultados no formato GRIB (*GRIdded Binary ou General Regularly-distributed Information in Binary form*).

No que se refere à configuração, o modelo é aplicado sobre dois domínios usando capacidade *nesting* com resolução espacial da malha de 5 e 15 km (Figura 7), numa projeção Cónica Conforme de *Lambert*, que interagem entre si através de uma estratégia denominada *two-way-nesting*.

Na Figura 7 estão representados os domínios de simulação usados na previsão meteorológica com modelo WRF.



Figura 8. Representação dos domínios de simulação usados na previsão meteorológica com modelo WRF.

## 4.2 Descrição dos testes realizados

A avaliação do desempenho do modelo meteorológico WRF compreendeu uma comparação entre os valores simulados e observados para a variável intensidade do vento, realizada a partir de seis simulações teste, com distintas configurações, e uma sétima simulação, correspondente à simulação de controlo operacional do modelo, com intuito de apurar a melhor configuração operacional em termos de parametrizações físicas.

Cada simulação efetuada compreende um conjunto de onze pontos localizados ao longo de Portugal Continental, conforme representado na Figura 8. Dez desses pontos escolhidos localizam-se nas áreas altas do interior do país, uma vez que se caracterizam como áreas com elevada intensidade do vento e com uma complexidade significativa do terreno. Estes pontos apesar de se localizarem muito próximos uns dos outros, apresentam diferentes características orográficas, do solo, da vegetação e proximidade de habitações que podem levar à observação de diferenças significativas nos resultados dos parâmetros

simulados pelo modelo WRF. De referir também, que um dos pontos foi escolhido junta à costa portuguesa de modo a se conseguir analisar a influência da intensidade do vento costeiro (circulação de brisa).

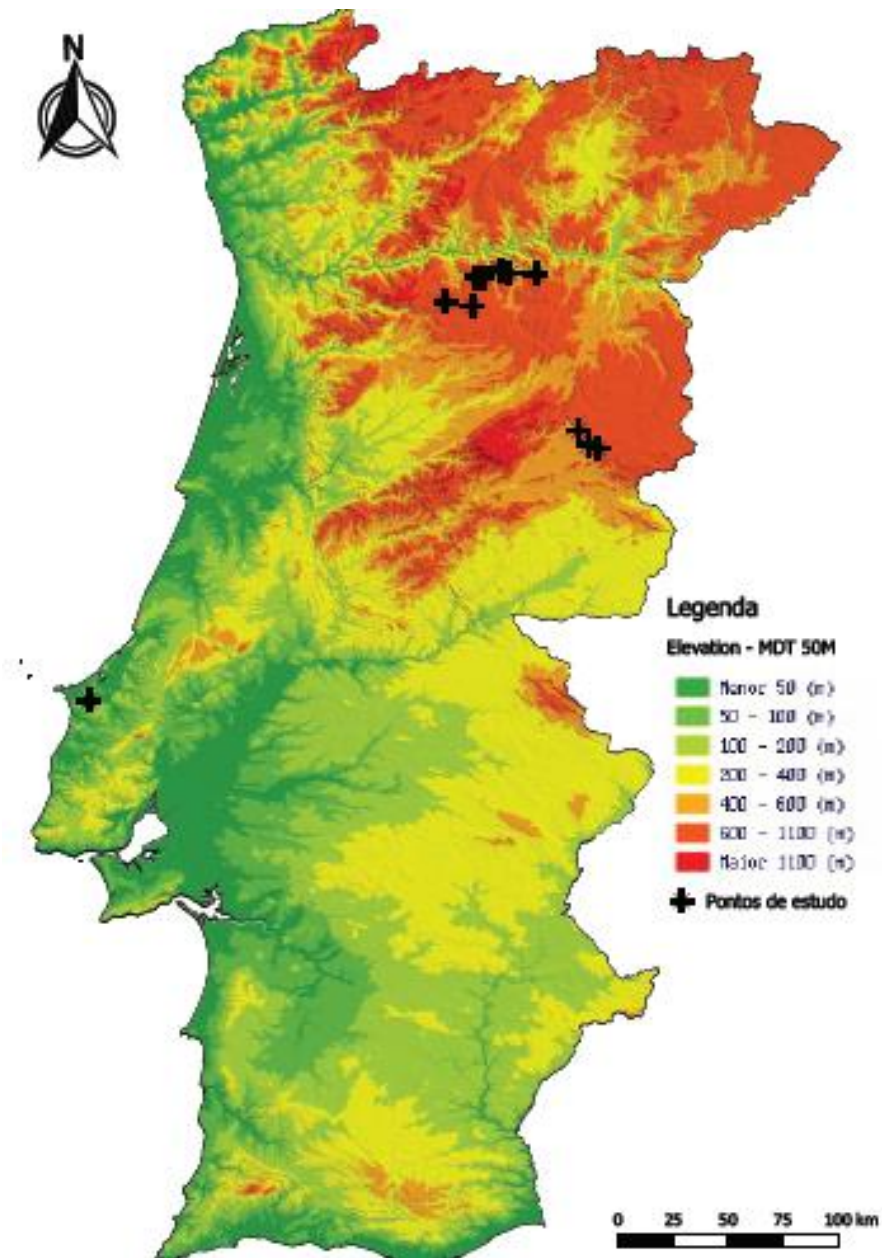


Figura 9. Representação dos pontos escolhidos para as simulações do modelo WRF.

As diferentes simulações teste reportam-se ao período compreendido entre o mês de setembro de 2016 e o de abril de 2017.

Anteriormente, a *Smartwatt* apresentava alguma dificuldade em prever eventos de rampa de intensidade de vento, ou seja, aumentos repentinos e diminuições de velocidade do vento num curto período de tempo. Assim, o presente estudo reportou o período mencionado anteriormente, que consubstancia eventos especiais de subidas rápidas, descidas rápidas, períodos estáveis de baixa intensidade de vento e períodos estáveis de alta intensidade de vento. Estes eventos apresentam grande relevância para a previsão que se desenvolve na empresa, uma vez que a previsão destes eventos se torna útil para o seu cliente na medida em que lhe permite tomar decisões informadas sobre a gestão dos parques eólicos, nomeadamente na calendarização da produção energia eólica de forma conservadora, evitando a necessidade de equilibrar mudanças inesperadas e o desenvolvimento de problemas funcionais.

Em anexo (Anexo I) consta uma representação gráfica de alguns dos significativos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade de vento que ocorrem no decurso do período testado, para cada um dos pontos escolhidos.

Existem, contudo, alguns períodos horários de falhas consideráveis nas simulações da intensidade do vento a 100 metros no decorrer destes meses de simulação, entre o dia 3 e 4 de setembro de 2016 e o dia 25 de outubro e 17 de dezembro de 2016, nomeadamente na simulação de controlo operacional realizada. Por este motivo, removeram-se esses períodos horários nas restantes simulações realizadas, para que as bases de dados simulados e observados se apresentassem inteiramente coerentes entre si, possibilitando posteriormente as comparações efetuadas.

As simulações teste realizadas diferem umas das outras na sua configuração, particularmente no tipo parametrização física usada de modo a que se consiga analisar e testar qual destas proporcionava os valores simulados mais próximos dos valores observados para a intensidade do vento a 100 metros.

O modelo WRF, como referido anteriormente, dispõe de um múltiplo conjunto de esquemas físicos de parametrizações, no entanto não foi exequível nem necessário incluir

todos os esquemas na configuração do modelo para se obter uma otimização eficiente das mesmas.

As parametrizações físicas escolhidas para as diferentes simulações foram as que, de certa forma, estão mais relacionadas com a previsão da intensidade do vento, nomeadamente a da Microfísica (MF), a da Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO), a da Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO), a da Camada Limite Planetária (CPL) e a de *Cumulus* (PC). As parametrizações da camada à superfície (CS) e do Modelo de Superfície de Solo (MSS) influenciam maioritariamente as trocas de calor, de humidade junto e no interior do solo, não tendo sido por isso seleccionadas para aplicação.

Para a parametrização da Microfísica (MF) foi empregue um conjunto de três esquemas físicos: o esquema mais avançado dos esquemas *WSMMP's* (*WRF Single Moment Microphysics*), o *WSM6*; o *WSM3* e o *WDM6* na maior parte das simulações realizadas.

Quanto aos esquemas físicos das parametrizações da Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO) e da Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO), foram utilizados três distintos. Para a parametrização da Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO) utilizaram-se os esquemas *RRTM* e *GFDL*, sendo o *RRTM* utilizado na maioria das simulações, uma vez que apresenta um reconhecimento mais fiável e eficaz. Já para a parametrização da Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO), o esquema físico mais usado foi o de *Dudhia*.

Os esquemas físicos *YSU*, *MYNN2* e *ACM* foram as três opções escolhidas para a parametrização da Camada Limite Planetária (CPL), em detrimento dos outros esquemas disponíveis para a respetiva parametrização. Uma das particularidades em alguns conjuntos de simulações do modelo WRF, nas parametrizações da CPL é apresentarem uma correção topográfica de ventos de superfície, nomeadamente na simulação 1,3 e 4 (*topo\_wind=1*). Contudo, em algumas simulações essa correção foi desativada, particularmente na simulação 2,5 e 6 (*topo\_wind=0*), de modo a se conseguir comparar e testar a sua influência no desempenho do modelo.

Por último, para as parametrizações de *Cumulus* (PC) foram aplicados os esquemas físicos *Grell 3-Ensemble*, *Betts-Miller-Jancic (BMJ)* e *Kain-Fritsch*, sendo o *Grell 3-Ensemble* o mais adotado nas simulações efetuadas.

Na tabela seguinte (Tabela 2) é apresentado uma síntese das parametrizações utilizadas no presente caso de estudo, mencionadas anteriormente. Por questões de sigilo profissional não é possível aqui identificar o conjunto de parametrizações testado em cada simulação teste.

*Tabela 2. Síntese das parametrizações utilizadas neste caso de estudo.*

<b>Parametrizações</b>	<b>Esquemas físicos</b>
Microfísica (MF)	<i>WDM6, WSM6, WSM3</i>
Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO)	<i>RRTM, GFDL</i>
Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO)	<i>Dudhia</i>
Camada Limite Planetária (CLP)	<i>YSU, MYNN2, ACM2</i>
Parametrização de <i>Cumulus</i> (PC)	<i>Grell 3-Ensemble, Betts-Miller-Jancic (BMJ), Kain-Fritsch</i>

Para avaliar quantitativamente o desempenho do modelo WRF nestas simulações realizadas referentes à previsão meteorológica, e, em particular, no prognóstico da intensidade do vento a 100 metros, aferiu-se e quantificou-se um conjunto de métricas de erro para cada ponto escolhido (Anexo II) e, posteriormente, para cada simulação calculou-se a respetiva média dessas métricas de erro de todos os pontos. Na secção seguinte descreve-se em detalhe cada uma das métricas de erro usadas.



### 4.3 Descrição das métricas de erro associadas

O conjunto de métricas de erro selecionado para avaliar o desvio dos valores simulados e dos valores observados relativamente à variável meteorológica intensidade do vento compreendeu: o erro médio viés (BIAS), o erro absoluto médio (MAE), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), percentagem média absoluta (MAPE), percentagem média absoluta normalizada (NMAPE) e o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ). Este leque de métricas de erro foi selecionado, com intuito de se obter uma análise mais completa da qualidade das previsões do WRF.

Os respetivos erros podem dever-se a várias fontes, nomeadamente a erros nas condições iniciais, erros no modelo, limitações de previsibilidade e erros aleatórios e sistemáticos (Chigullapalli & Mölders, 2008).

O erro médio de viés (BIAS), foi determinado a partir da média espacial das diferenças entre os valores simulados ( $\theta_{sim}$ ) e os observados ( $\theta_{obs}$ ), dado pela seguinte equação:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta i'$$

onde,

$$\theta i' = \theta_{sim} - \theta_{obs} \quad (4.1)$$

Este erro permite avaliar o enviesamento dos valores simulados face aos observados. Se este for positivo indica que os valores simulados tendem a sobrestimar os valores observados, enquanto que se for negativo significa que o modelo tende a subestimar os valores observados (Carvalho et al., 2012). Contudo, esta métrica de erro apesar de refletir o desvio das simulações em termos médios, não se apresenta como um bom indicativo para a verificação do acerto dos valores simulados face aos observados (Rodrigues, 2014).

Para se avaliar a média da magnitude dos erros, usou-se o erro absoluto médio (MAE), traduzido pela equação:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\theta_i'| \quad (4.2)$$

O MAE traduz-se pela média das diferenças absolutas entre as simulações e as observações. Quanto menor, mais semelhantes se apresentam os valores simulados e os valores observados. Se este for igual ao viés, significará que o modelo quando erra, erra no mesmo sentido, sobrestimando ou subestimando sempre os valores (Rodrigues, 2014).

Como complemento, usou-se a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), que é uma medida análoga ao MAE, mas mais sensível a elevados erros (Carbonell et al., 2013). Esta medida trata-se de uma medida de precisão, uma vez que eleva ao quadrado a diferença entre os valores simulados e os observados, como mostra a equação seguinte:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i')^2} \quad (4.3)$$

O RMSE será sempre um valor positivo, sendo que, quanto mais próximo de 0 melhor serão os resultados do modelo. Um valor aproximado de zero indica uma previsão quase perfeita e aumentará proporcionalmente ao aumento da diferença entre os valores de simulação e os de observação. Quando os valores de RMSE são elevados apontam para a existência de grande disparidade entre os valores simulados e os valores observados. Caso o viés se apresente com um valor baixo, o RMSE aponta para uma dispersão dos resultados do modelo relativamente às simulações (Rodrigues, 2014).

Foi ainda usado outro tipo de métrica de erro, que expressa a precisão do erro em percentagem, a percentagem média absoluta (MAPE), dado pela expressão:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\theta_i'}{\theta_{obs}} \times 100 \quad (4.4)$$

A percentagem média absoluta normalizada (NMAPE) também usada é definida a partir da seguinte equação:

$$NMAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\theta_i'}{\max(\theta_{obs})} \times 100 \quad (4.5)$$

O NMAPE expressa a precisão do erro normalizada em percentagem. Este erro é normalizado pelo máximo dos valores observados.

Por fim, o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) mede o grau de correlação entre os valores observados e os valores simulados, calculada através da seguinte expressão:

$$r = \frac{(\sum_{i=1}^n (\theta_{obs} - \overline{\theta_{obs}})(\theta_{sim} - \overline{\theta_{sim}}))}{\left(\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{obs} - \overline{\theta_{obs}})^2}\right) \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{sim} - \overline{\theta_{sim}})^2}\right)}$$

Onde,

$$\overline{\theta_{obs}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{obs} \quad \text{e} \quad \overline{\theta_{sim}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{sim} \quad (4.6)$$

Este coeficiente varia entre os valores -1 e 1, sendo que  $r=1$  significa que existe uma relação linear crescente entre as duas variáveis, e  $r=-1$  significa que ocorre o inverso, ou seja, quando uma das variáveis aumenta a outra diminuirá. No caso de  $r=0$ , não há dependência linear entre as duas variáveis (Chigullapalli & Mölders, 2008).

Na tabela 3, serão sintetizadas as diferentes métricas de erro usadas na avaliação do modelo de previsão WRF.

Tabela 3. Tabela síntese de descrição das métricas de erro calculadas.

Métrica de Erro	Equação	Unidade	Função
Erro médio de viés (BIAS)	$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta i'$ <p>onde,</p> $\theta i' = \theta sim - \theta obs$	m.s <sup>-1</sup>	Avaliar o enviesamento dos valores simulados face os valores observados
Erro absoluto médio (MAE)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  \theta i' $	m.s <sup>-1</sup>	Avaliar a média da magnitude dos erros
Raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta i')^2}$	m.s <sup>-1</sup>	Medir a precisão do erro entre os valores simulados e os valores observados
Percentagem média absoluta (MAPE)	$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\theta i'}{\theta obs} \times 100$	%	Expressar a precisão do erro em percentagem
Percentagem média absoluta normalizada (NMAPE)	$NMAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\theta i'}{\max(\theta obs)} \times 100$	%	Expressar a precisão do erro normalizada em percentagem
Coeficiente de correlação de Pearson (r)	$r = \frac{(\sum_{i=1}^n (\theta obs - \overline{\theta obs})(\theta sim - \overline{\theta sim}))}{\left(\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta obs - \overline{\theta obs})^2}\right) \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta sim - \overline{\theta sim})^2}\right)}$ <p>Onde,</p> $\overline{\theta obs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta obs \quad \text{e} \quad \overline{\theta sim} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta sim$		Mede o grau de correlação entre os valores simulados e os valores observados

## 4.4 Análise e discussão de resultados

Nesta secção, são apresentados e analisados os resultados referentes às simulações teste reportadas anteriormente, nomeadamente os resultados do cálculo das métricas de erro para cada uma delas.

Para cada uma das simulações, foi também realizada uma comparação entre a previsão do modelo WRF e a previsão de um fornecedor externo, com o intuito de avaliar o desempenho destas previsões de intensidade do vento a 100 metros efetuadas na empresa.

Assim sendo, a seguinte tabela (Tabela 4) mostra os valores das médias das métricas de erro calculadas para cada simulação realizada e para o fornecedor externo. É necessário realçar, uma vez mais, que o cálculo das métricas de erro levou em consideração apenas períodos onde não ocorreram problemas relacionados à ausência ou falhas de dados simulados.

*Tabela 4. Valores das médias das métricas de erro calculadas.*

<b>Simulação</b>	<b>BIAS [m.s<sup>-1</sup>]</b>	<b>MAE [m.s<sup>-1</sup>]</b>	<b>RMSE [m.s<sup>-1</sup>]</b>	<b>MAPE [%]</b>	<b>NMAPE [%]</b>	<b>r</b>
EXT_PROV	-0,60	1,74	2,41	36,36	6,89	0,85
run1	0,77	2,13	2,80	47,42	8,57	0,78
run2	1,20	2,16	2,83	48,97	8,70	0,81
run3	0,75	2,10	2,79	45,81	8,52	0,79
run4	1,34	2,22	2,86	40,09	8,97	0,82
run5	1,18	2,11	2,77	47,89	8,49	0,83
run6	1,19	2,11	2,76	47,95	8,50	0,83
run_control	0,89	2,18	2,81	49,33	8,89	0,79

Para se avaliar com maior clareza a comparação entre os resultados do conjunto de métricas de erro calculadas (BIAS, MAE, RMSE, MAPE, NMAPE e r) em cada simulação, representou-se, graficamente, cada uma dessas métricas de erro (Figuras 9, 10, 11, 12, 13 e 14).

Seguidamente, na Figura 9 são apresentados os resultados para o erro médio de viés (BIAS).

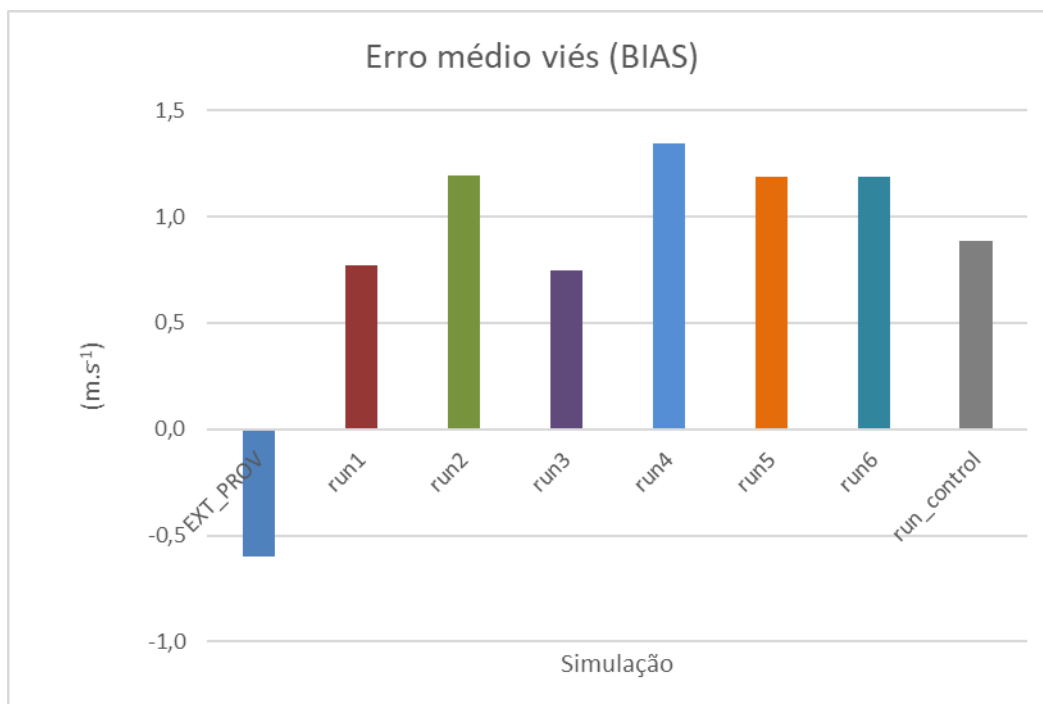


Figura 10. Métrica de erro BIAS calculada para cada simulação.

Analisando os valores do erro médio viés (BIAS) nas simulações realizadas, pode-se verificar que estes são positivos, estando compreendidos entre 0 e 1,34 m.s<sup>-1</sup>, sendo possível se concluir que o modelo sobrestima a velocidade do vento a 100 metros face ao observado. Relativamente ao valor do BIAS da previsão do fornecedor externo, observa-se o oposto, os valores simulados deste modelo externo, para a velocidade do vento a 100 metros, estão subestimados, relativamente aos observados, dado que o seu valor é negativo (da ordem dos 0,60 m.s<sup>-1</sup>).

Em termos de comparação com os valores da métrica de erro BIAS da previsão do fornecedor externo, a simulação 3 é a que apresenta melhor resultado (BIAS com valor inferior) e a simulação 4 é a que oferece piores resultados (BIAS mais elevado).

As simulações 2, 5 e 6 apresentam-se muito idênticas, uma vez que os valores de BIAS são muito próximos uns dos outros (entre 1,18 e 1,20  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). No entanto, estes valores encontram-se consideravelmente afastados (superiores na ordem dos 1,78  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  e dos 1,80  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) do valor de BIAS da previsão concedida pelo fornecedor externo.

Na Figura 10 apresentam-se os resultados para o erro absoluto médio (MAE).

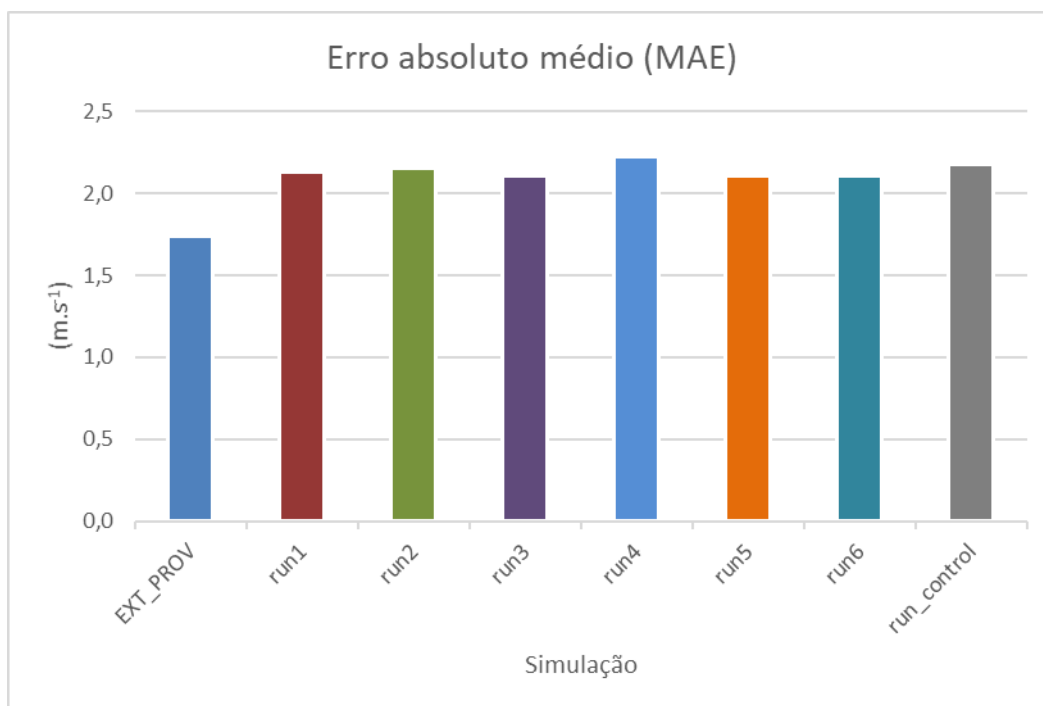


Figura 11. Métrica de erro MAE calculada para cada simulação.

Pela análise do gráfico referente aos valores de erro absoluto médio (MAE), pode-se observar que as simulações realizadas apresentam valores muito próximos, com variações entre 2,10 e 2,22  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

A simulação 4 é a que apresenta valor máximo de MAE de 2,22  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , significando que os valores simulados para a velocidade do vento a 100 metros são distintos dos valores observados. A simulação 3 é a que apresenta maior semelhança entre os valores simulados e os observados, uma vez que tem o valor mínimo de MAE de 2,10  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Comparativamente aos valores de MAE da previsão do fornecedor externo, a simulação 3 é que apresenta um valor mais satisfatório de 2,10  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (próximo 0,36  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) e a simulação 4 é a que apresenta um valor menos satisfatório de 2,22  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (superior 0,48  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

As simulações 5 e 6 apresentam-se idênticas, com um valor de MAE  $0,37 \text{ m.s}^{-1}$  afastado do valor observado na previsão do fornecedor externo.

A figura seguinte (Figura 11) apresenta os resultados para a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE).

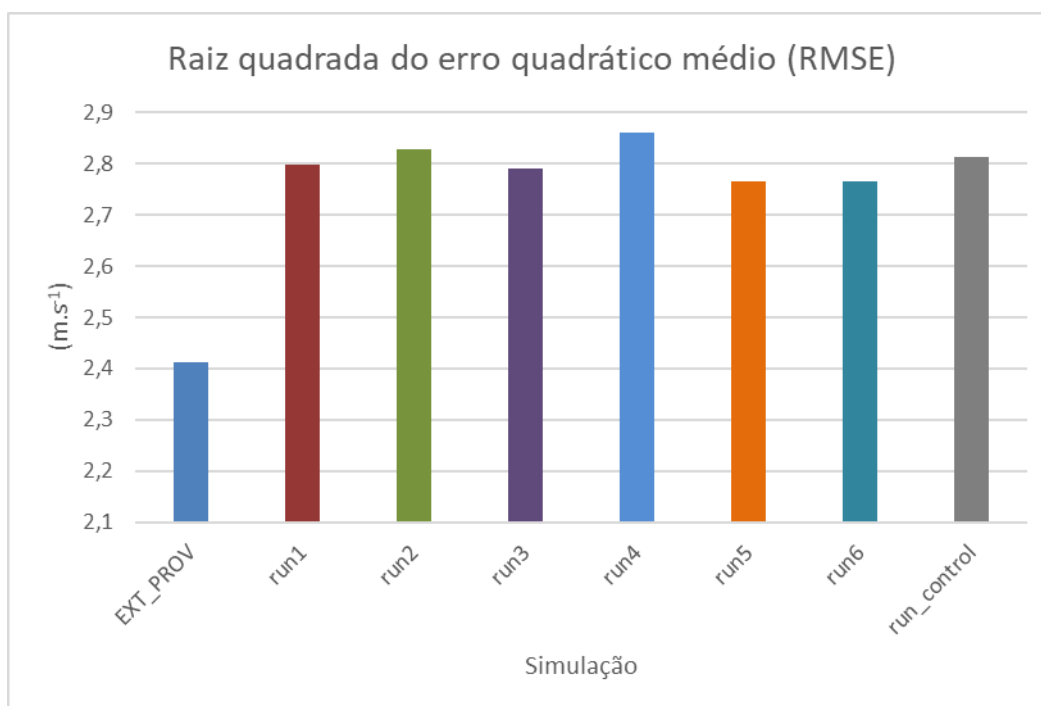


Figura 12. Métrica de erro RMSE calculada para cada simulação.

No que se refere ao gráfico dos valores da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), observa-se que todas as simulações efetuadas apresentam valores numa gama elevada entre os  $2,76$  e os  $2,86 \text{ m.s}^{-1}$ , apresentando-se muito próximos uns dos outros. No entanto, é visível que a simulação 4 apresenta o valor mais elevado, de  $2,86 \text{ m.s}^{-1}$ , indicando uma maior disparidade entre os valores simulados de velocidade de vento a 100 metros e os valores observados.

Relativamente ao valor da métrica de erro RMSE da previsão do fornecedor externo, as simulações 5 e 6 são as que apresentam um valor mais próximo (diferem aproximadamente  $0,36 \text{ m.s}^{-1}$ ) e a simulação 4 a que mostra um valor mais afastado (diferem  $0,45 \text{ m.s}^{-1}$ ). Também, as restantes simulações (1,2,3 e de controlo) apresentam



um valor de RMSE distanciado (entre 0,36 e 0,42 m.s<sup>-1</sup>) do valor concebido pela previsão do fornecedor externo para a intensidade do vento a 100 metros.

A Figura 12 mostra os resultados obtidos para a percentagem média absoluta (MAPE).

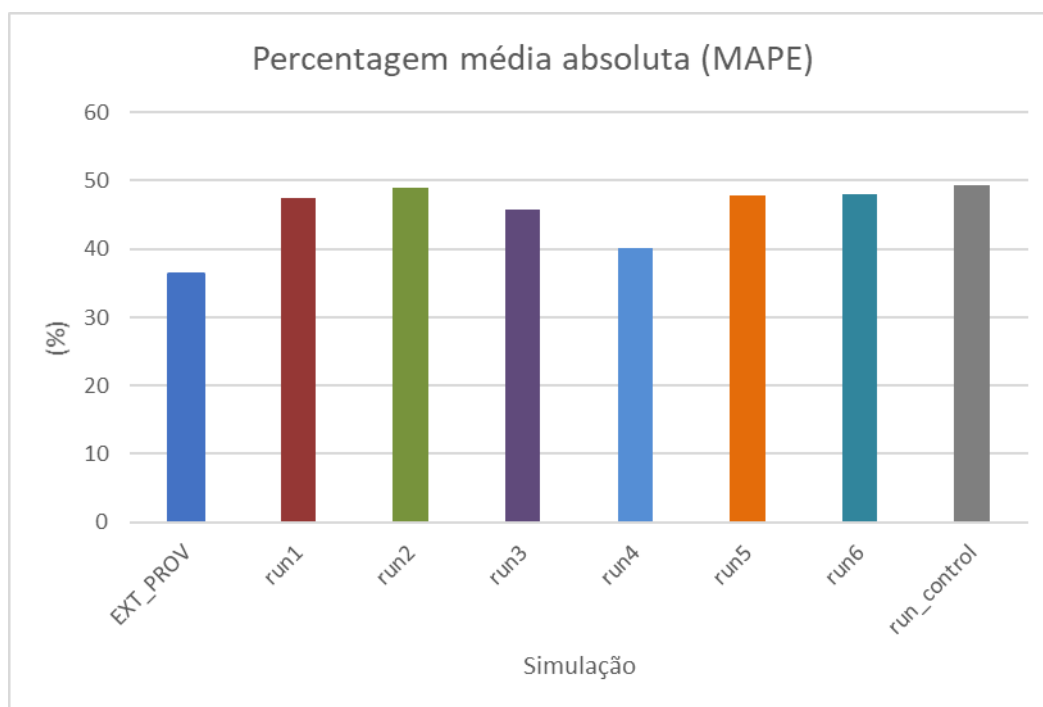


Figura 13. Métrica de erro MAPE calculada para cada simulação.

Ao analisar o gráfico relativo aos valores da percentagem média absoluta (MAPE), verifica-se que estes, nas diversas simulações realizadas, encontram-se elevados (numa gama superior a 40%) comparativamente ao valor de precisão de erro observado na previsão do fornecedor externo para a velocidade do vento a 100 metros.

O valor máximo observado para MAPE verifica-se na simulação de controlo (49,33%), estando distanciado 12,97% do valor observado na previsão do fornecedor externo. Já o valor mínimo verifica-se na simulação 4 (40,09%), estando apenas afastado 3,73% do valor observado na previsão do fornecedor externo.

As simulações 5 e 6 apresentam-se, mais uma vez, muito semelhantes, uma vez que os valores de MAPE são muito próximos (47,89 e 47,95%, respetivamente), no entanto

estes valores são relativamente elevados para a previsão da velocidade do vento a 100 metros.

Em seguida, na Figura 13 são apresentados os resultados obtidos para a percentagem média absoluta normalizada (NMAPE).

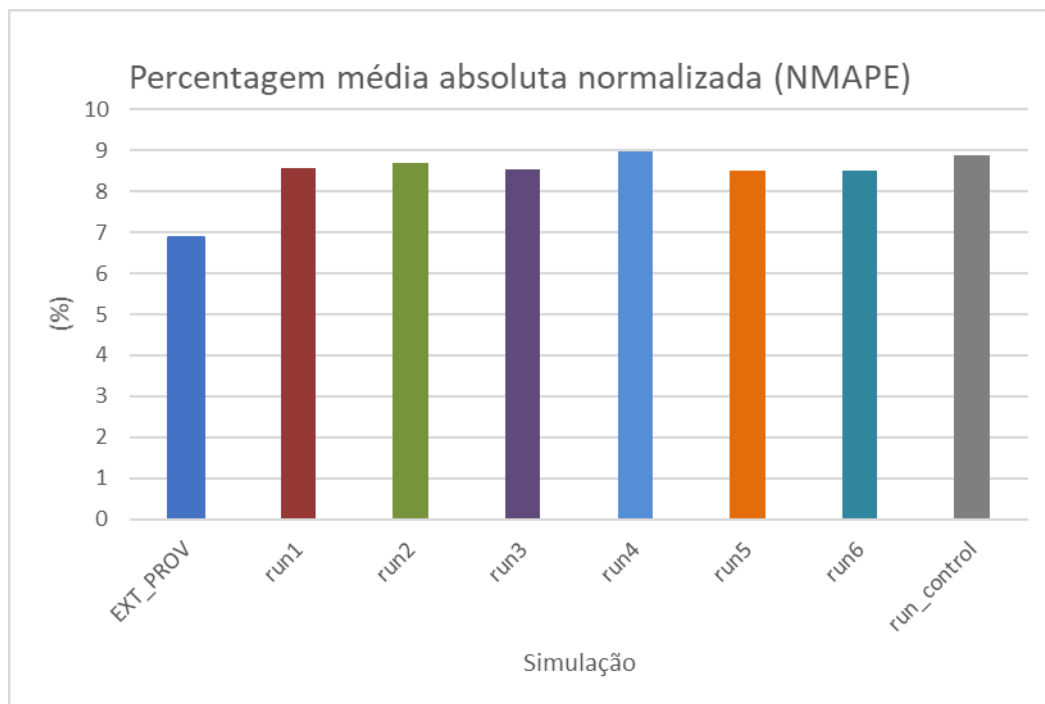


Figura 14. Métrica de erro NMAPE calculada para cada simulação.

A partir da análise do gráfico referente aos valores da percentagem média absoluta normalizada pelo máximo das observações (NMAPE), pode aferir-se que estes em todas as simulações efetuadas encontram-se na gama dos 8%, 2% acima do valor de precisão de erro normalizado observado na previsão do fornecedor externo da velocidade do vento a 100 metros (6,89%).

A simulação 4 é a que apresenta um valor superior de 8,97%, valor acima 2,08% do valor observado na previsão do fornecedor externo, e a simulação 5 é a que apresenta um

valor inferior de 8,49%, mas ainda assim acima 1,6% do valor observado na previsão do fornecedor externo.

Mais uma vez, as simulações 5 e 6 apresentam-se muito idênticas, uma vez que os valores de NMAPE das duas são muito próximos, encontrando-se superiores aproximadamente 1,6% ao valor observado na previsão do fornecedor externo.

Por último, a Figura 14 mostra os resultados para o coeficiente de Pearson (r).

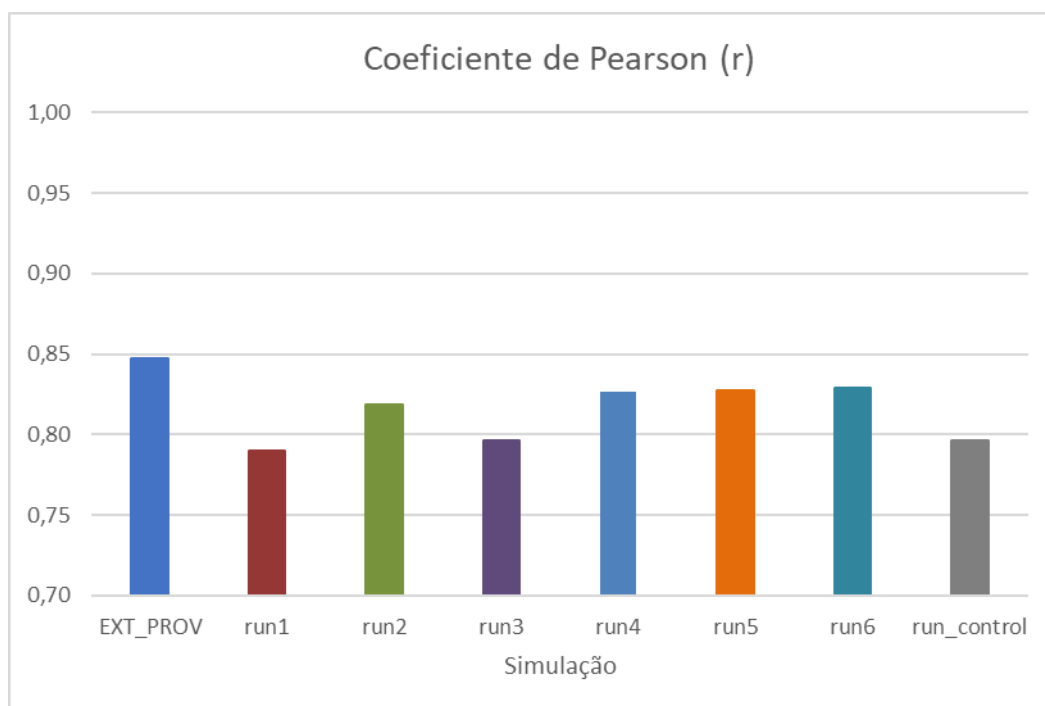


Figura 15. Métrica de erro r calculada para cada simulação.

Pela análise do gráfico dos coeficientes de Pearson (r) entre os valores simulados e os observados para a velocidade do vento a 100 metros, verificou-se que os valores obtidos para as simulações efetuadas na empresa situam-se entre 0,78 e 0,83, aproximadamente, enquanto que o valor obtido para a previsão dos fornecedores externos foi de 0,85. Nenhum dos valores obtidos para as simulações testadas se encontram muito discrepantes comparativamente ao valor obtido na previsão do fornecedor externo.

Destacam-se os bons resultados das simulações 5 e 6 que apresentam um maior valor de coeficiente de Pearson (de 0,83) e um valor mais próximo do valor obtido na previsão do fornecedor externo. Já a simulação 1 é a que apresenta pior resultado, com um

valor do coeficiente de Pearson mais afastado do obtido na previsão do fornecedor externo (de 0,78).

Observa-se também, uma semelhança nas simulações 3 e na de controlo relativamente ao valor do coeficiente de Pearson, apresentando igual valor de 0,79.

## 4.5 Resultado do desempenho das simulações testadas

Com base na análise dos resultados do cálculo de cada uma das métricas de erro, realizada anteriormente, foi possível retirar algumas conclusões no que respeita o desempenho das simulações testadas para a intensidade do vento, e, conseqüentemente, tomar decisões sobre o que pode ser usado para melhorar e tornar mais eficiente o sistema de previsão efetuado operacionalmente na *Smartwatt* (com base no modelo WRF).

Na tabela seguinte (Tabela 5) é apresentada uma síntese qualitativa do desempenho das simulações efetuadas relativamente a cada uma das métricas de erro avaliadas, tendo em conta o valor obtido para as métricas de erro na previsão do fornecedor externo.

Os resultados do desempenho das simulações efetuadas foram agrupados em “Bom”, “Razoável” e “Mau”. O resultado do desempenho de dada simulação é “Bom” se o valor da respetiva métrica de erro for semelhante ao valor da métrica de erro obtida na previsão do fornecedor externo. O resultado do desempenho de dada simulação é “Mau” se o valor da respetiva métrica de erro for díspar do valor da métrica de erro obtida na previsão do fornecedor externo. Se o valor da métrica de erro de dada simulação estiver entre o valor mais semelhante e o valor mais díspar do valor obtido na previsão do fornecedor externo, o desempenho da simulação é “Razoável”.

Tabela 5. Síntese do desempenho das simulações testadas.

Simulação	Métrica de erro					
	viés	MAE	RMSE	MAPE	NMAPE	r
run_control	Razoável	Mau	Mau	Mau	Mau	Mau
run1	Razoável	Mau	Mau	Mau	Mau	Mau
run2	Mau	Mau	Mau	Mau	Mau	Razoável
run3	Bom	Bom	Razoável	Razoável	Razoável	Razoável
run4	Mau	Mau	Mau	Bom	Mau	Razoável
run5	Mau	Razoável	Razoável	Mau	Bom	Bom
run6	Mau	Razoável	Bom	Mau	Razoável	Bom

<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #4F7942; border: 1px solid black;"></span> Bom	<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #FFFF00; border: 1px solid black;"></span> Razoável	<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #FF0000; border: 1px solid black;"></span> Mau
---	--	---

Analisando pormenorizadamente o quadro síntese de desempenho das simulações testadas, concluiu-se que a simulação 3 é a que apresenta melhor desempenho perante todas as outras simulações testadas, já que oferece melhores resultados de métricas de erro, ou seja, uma boa concordância entre os dados simulados e os observados. Assim, esta simulação é a mais propícia para uma previsão de intensidade do vento a 100 metros, mas ainda assim poderá ser novamente testada com novas configurações do modelo WRF de modo a se otimizar ainda mais o sistema de previsão realizado pela empresa.

De referir também, que se concluiu que as simulações 1,2 e a de controlo são as que exibem pior desempenho, apresentando valores de métricas de erro relativamente elevados para a previsão que se pretende.

Exposto isto, foi assim possível verificar qual a melhor configuração operacional do modelo WRF para a previsão da intensidade do vento a 100 metros em termos de parametrização física, particularmente os esquemas físicos que concedem melhores resultados.

Para a parametrização da Camada Limite Planetária (CLP) no modelo, constatou-se que os esquemas físicos que oferecem melhores resultados e se mostram mais adequados à aplicação perante o conjunto de todos os outros aplicados são o *ACM2* e o *YSU*.

Os esquemas físicos *Betts-Miller-Jancic (BMJ)* e *Grell 3-Ensemble* são os que se verificaram com melhores resultados para a parametrização de *Cumulus (PC)* e, conseqüentemente, mais pertinentes para a aplicação.

Em todas as simulações, verificou-se que o esquema físico de *Dudhia* é o que apresenta melhores resultados, sendo o mais apto para a aplicação na parametrização de Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO), e o *RRTM* e *GFDL*, os mais adequados para a parametrização Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO).

Por fim, concluiu-se que os esquemas físicos mais consistentes para aplicação da parametrização de Microfísica (MF) são os *WDM6* e o *WSM6*.

Deve-se ressaltar que os resultados aqui apresentados são apenas para a intensidade do vento a 100 metros e que quando se testa outros parâmetros do campo de vento, como a direção do vento, os esquemas físicos de parametrização que neste presente caso de estudo produzem bom desempenho, podem não apresentar os mesmos resultados e a mesma adequabilidade.

Em resumo, o sucesso referente a uma dada configuração operacional do modelo WRF, nomeadamente das parametrizações utilizadas, não deve ser interpretado como aplicável a qualquer outra variável meteorológica, isto é, a combinação de parametrizações que melhores resultados apresentam para a simulação da velocidade do vento não será, forçosamente a melhor combinação de parametrizações para a simulação da temperatura, por exemplo.



## 5. Conclusões e recomendações

Neste capítulo é feita uma síntese geral de todos os capítulos que integram este relatório, e apresentada uma reflexão e apreciação global de todas as atividades e respetivos objetivos do trabalho realizado no decorrer deste estágio curricular, rematando com algumas recomendações e sugestões de melhoria para um trabalho futuro.

Nos capítulos iniciais deste relatório procurou-se contextualizar todo o trabalho desenvolvido durante o estágio, bem como realizar uma minuciosa revisão das abordagens teóricas inerentes ao principal objetivo do trabalho.

No segundo capítulo efetuou-se a caracterização da entidade de acolhimento onde se realizou o estágio, com uma breve descrição da sua atividade, história, evolução e dos vetores para a qual atua e no qual se foca o trabalho. Este estágio curricular realizou-se na *Smartwatt- Solutions for Energy Systems, SA*, localizada na cidade do Porto. Esta caracteriza-se por ser uma empresa tecnológica que investe fortemente na área da energia, com o objetivo de desenvolver novos produtos e/ou serviços na área da energia. Com intuito de otimizar o uso dos recursos energéticos existentes, esta empresa atua em três vetores distintos, energias renováveis, eficiência energética e inteligência, sendo neste último onde se enquadrou o meu trabalho.

No terceiro capítulo foram abordados e avaliados os principais serviços de previsão meteorológica empregues pela empresa, nomeadamente o usado na realização das simulações neste trabalho - o modelo WRF - evidenciando algumas das suas principais componentes, entre as quais os domínios de simulação, parametrizações e condições de fronteira, e foi demonstrada a sua importância para o trabalho desenvolvido.

No quarto capítulo, descreveu-se o processo realizado para a otimização do sistema de previsão WRF utilizado pela empresa, particularmente no que diz respeito ao seu desempenho na previsão da variável intensidade do vento à superfície (100 metros). Neste sentido, foi realizada uma descrição e análise detalhada de todas as simulações do WRF efetuadas e do conjunto de métricas de erro empregues para avaliar e testar quantitativamente o desempenho do modelo WRF na previsão da velocidade do vento a



100 m. Todas as simulações WRF efetuadas neste trabalho compreenderam o período entre o mês de setembro de 2016 e o de abril de 2017. Este período de teste inclui eventos de subidas rápidas, descidas rápidas, períodos estáveis de baixa intensidade do vento e períodos estáveis de alta intensidade do vento. Estes eventos apresentam grande importância para a previsão que se desenvolve na *Smartwatt*, uma vez que a previsão destes se torna útil para o seu cliente na medida em que lhe permite tomar decisões informadas sobre a gestão dos parques eólicos, nomeadamente na calendarização adequada da produção energia eólica, evitando a necessidade de equilibrar mudanças inesperadas e o desenvolvimento de problemas funcionais.

É de salientar que ocorreram falhas consideráveis de períodos horários numa das simulações, que tiveram de ser excluídos em todas as simulações de forma a que as bases de dados simulados e observados fossem inteiramente coerentes entre si, permitindo, assim, as comparações efetuadas.

Foi selecionado um conjunto de métricas de erros, BIAS, MAE, RMSE, MAPE e NMAPE e  $r$ , sendo que os resultados obtidos nos seus cálculos permitiram avaliar o desempenho das diferentes simulações teste do modelo WRF.

A partir da análise dos valores obtidos para o BIAS pode-se verificar que o modelo WRF sobrestima a velocidade do vento a 100 metros face aos valores observados. Para esta métrica de erro e para o MAE, a simulação 3 é a que evidencia melhores resultados e a simulação 4 a que mostra piores resultados relativamente ao valor obtido na previsão do fornecedor externo.

Relativamente ao RMSE, pode-se concluir que a simulação 4 também oferece piores resultados ( $2,86 \text{ m.s}^{-1}$ ), indicando uma maior disparidade entre os valores simulados e os valores observados para a velocidade do vento a 100 metros. Por outro lado, a simulação 5 e 6 mostram o oposto, uma semelhança entre os valores simulados e os observados, apresentando um valor de  $2,77 \text{ m.s}^{-1}$  e de  $2,76 \text{ m.s}^{-1}$ , respetivamente.

Os valores de MAPE e NMAPE em todas as simulações efetuadas apresentam-se relativamente elevados comparativamente aos obtidos na previsão do fornecedor externo. O MAPE apresenta melhores resultados na simulação 4 (40,09%) e resultados menos favoráveis na simulação de controlo (49,33%). Já o NMAPE oferece melhores resultados na

simulação 5 (8,49%) e piores na corrida de simulação 4 (8,97%), para a previsão que se pretende.

No que se refere aos valores obtidos para o coeficiente de Pearson ( $r$ ), nenhuma simulação efetuada apresenta um valor discrepante analogamente ao valor obtido na previsão do fornecedor externo. No entanto, é visível que as simulações 5 e 6 apresentam melhores resultados (0,83) e a simulação 1 piores resultados (0,78) face às outras simulações testadas.

Também foi possível concluir que, para maioria das métricas de erro calculadas, as simulações 5 e 6 exibem grandes semelhanças, uma vez que apresentam resultados muito idênticos.

Analisando globalmente todos os resultados obtidos nas métricas de erro, foi possível concluir que a simulação 3 é a que exhibe melhor desempenho na previsão de intensidade do vento a 100 metros, perante todas as outras testadas. Por outro lado, as simulações 1, 2 e de controlo são as que se mostram com pior desempenho, apresentando valores de métricas de erro relativamente elevados para a previsão que se pretende.

Com esta análise também se apurou qual a melhor configuração operacional do modelo WRF em termos de parametrização física, nomeadamente quais os esquemas físicos que oferecem melhores resultados.

Os esquemas físicos *ACM2* e *YSU* são mais adequados para a parametrização da Camada Limite Planetária (CLP) no modelo, uma vez que apresentaram melhores resultados no conjunto de todos os esquemas aplicados.

Para a parametrização de *Cumulus* (PC) os esquemas físicos que apresentam melhores resultados são o *Betts-Miller-Jancic* (*BMJ*) e o *Grell 3-Ensemble*, sendo estes os mais pertinentes para a aplicação no modelo WRF.

Em todas as corridas de simulação, o esquema *Dudhia* é o que oferece melhores resultados, sendo o mais adequado para a parametrização de Radiação de Curto Comprimento de Onda (RCO), e o *RRTM* e *GFDL*, os melhores esquemas físicos para a parametrização Radiação de Longo Comprimento de Onda (RLO).

Para finalizar, conclui-se que para a parametrização de Microfísica (MF), os esquemas físicos mais adequados são o *WDM6* e o *WSM6*.

Deve-se salientar que o sucesso referente a uma dada configuração operacional do modelo WRF, particularmente das parametrizações testadas, não deve ser interpretado como aplicável a qualquer outra variável meteorológica.

Em suma, este trabalho permitiu melhorar o serviço de previsão do campo de vento (velocidade) realizado pela *Smartwatt*, possibilitando que a empresa forneça, de forma coerente, dados meteorológicos a outras empresas que necessitem de ter um conhecimento aprofundado do regime de vento presente em determinadas áreas, quer para a monitorização dos parques eólicos atuais, quer para o futuro, na caracterização de possíveis áreas de implementação de novos projetos eólicos.

Exposto isto, os objetivos iniciais propostos para o desenvolvimento deste trabalho no estágio curricular foram alcançados, tendo sido possível testar e melhorar o desempenho do modelo WRF no prognóstico da variável intensidade do vento e assim melhorar o serviço de previsão oferecido pela empresa *Smartwatt*.

Para além dos objetivos propostos terem sido alcançados, este estágio proporcionou-me experiências enriquecedoras, tanto a nível pessoal como a nível profissional, possibilitando a aplicação das abordagens teóricas adquiridas no decurso da minha formação académica aos diferentes contextos da prática da empresa e a promoção do contato e aprendizagem de boas práticas, de modo a ganhar mais confiança nas minhas capacidades e a desenvolver competências profissionais propícias e autónomas.

Termino este estágio e a minha formação académica na Universidade de Aveiro munida com ferramentas académicas e profissionais, com as quais serei capaz de enfrentar o mercado de trabalho.

Para um futuro trabalho, proponho que no processo de avaliação quantitativa do desempenho do modelo WRF nas simulações realizadas não se calcule apenas a média das métricas de erro analisadas em todos os pontos, mas também se calcule o desvio padrão associado a essa média. Este desvio padrão fornecerá informação sobre a dispersão dos dados em relação à média, ou seja, o quanto esses dados estão distantes da média. Se o desvio padrão for baixo indicará que os valores obtidos de métricas de erro para cada ponto tendem a estar próximos da média. Por outro lado, se for alto indicará o contrário, valores obtidos de métricas de erro para cada ponto distantes da média.

O presente trabalho poderá ainda ser aperfeiçoado com a melhoria do processo de configuração do modelo WRF para a simulação da velocidade do vento a 100 metros e com a extensão desta análise a outras variáveis meteorológicas ou a outros casos de estudo de simulação de situações extremas.



## Referências Bibliográficas

Banks, R. F., & Baldasano, J. M. (2016). Impact of WRF model PBL schemes on air quality simulations over Catalonia, Spain. *Science of the Total Environment*, 572, 98–113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.167>

Banks, R.F, Tiana-Alsina, J., Baldasano, JM, Rocadenbosch, F., Papayannis, A., Solomos, S., & Tzani, C.G. (2016). Sensibilidade de variáveis de camada limite a esquemas PBL no modelo WRF com base em observações meteorológicas de superfície, lidar e radiosondes durante a campanha de HygrA-CD. *Pesquisa Atmosférica*, 176 - 177, 185-201.

Carbonell, L. T., Mastrapa, G. C., Rodriguez, Y. F., Escudero, L. A., Gacita, M. S., Morlot, A. B., ... Rivas, S. P. (2013). Assessment of the Weather Research and Forecasting model implementation in Cuba addressed to diagnostic air quality modeling. *Atmospheric Pollution Research*, 4(1), 64–74.

Carvalho, D.J. (2009). Optimização do modelo numérico de previsão do tempo WRF no contexto de previsão e produção de energia eólica (Master's Thesis, Universidade de Aveiro). Retrieved from <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/2646/1/2010000350.pdf>

Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., & Santos, C. (2012). A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy. *Environmental Modelling & Software*, 33, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.01.019>

Carvalho, D., Rocha, A., Santos, C. S., & Pereira, R. (2013). Wind resource modelling in complex terrain using different mesoscale–microscale coupling techniques. *Applied Energy*, 108, 493–504. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.074>

Chigullapalli, S., & Mölders, N. (2008). Sensitivity studies using the Weather Research and Forecasting (WRF) model, 15.

Coleman, J.S.M., Law, K.T. (2015). Meteorology. In Elsevier (Ed.), *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Bull State University, Muncie, IN, USA; Marshall University, Huntington, WV, USA.

Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, D.M., Neale, R.B., Rach, P.J., Vertenstein, M., Worley, P.H., Yang, Z.L., Zhang, M. (2011). The Community Climate System Model Version 4. *Journal of Climate*, 24(19), 4973–4991.

Hong, S.Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318–2341.

Hong, S.Y. (2010). Um novo esquema estável de mistura de camada limite e seu impacto na simulação da monção de verão do leste asiático. *Jornal trimestral da Royal Meteorological Society*, 136 (651), 1481-1496.

Michalakes, J., J. Dudhia, D. G., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W., & Wang, W. (2004). *The Weather Research And Forecast Model: Software Architecture and Performance*. Paper presented at the ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing In Meteorology.

Mylonas, M. P., Barbouchi, S., Herrmann, H., & Nastos, P. T. (2018). Sensitivity analysis of observational nudging methodology to reduce error in wind resource assessment (WRA) in the North Sea. *Renewable Energy*, 120, 446–456.

Monforte, H. M. R. (2014). Caracterização do Potencial Eólico em Portugal pelo WRF (Master's thesis, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro). Retrieved from <https://repositorio.utad.pt/handle/10348/5849>.

NCAR, (2015). Version 3 Modeling System User's Guide. Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research. Retrieved from [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3.6/ARWUsersGuideV3.6.1.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.6/ARWUsersGuideV3.6.1.pdf)

NCAR, (2018). Version 3 Modeling System User's Guide. Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research. Retrieved from [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3.8/ARWUsersGuideV3.8.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.8/ARWUsersGuideV3.8.pdf)

NOAA, (2014). National Centers for Environmental Information. National Oceanic and Atmospheric Administration. Retrieved from <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>

Parker, D.J. (2015). Mesoscale Meteorology. In Elsevier (Ed.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (pp. 316-322). Leeds, Reino Unido.

Rodrigues, G.C. (2014). Validação do modelo WRF na simulação do vento e precipitação na ilha das Flores, no contexto da produção de energia renovável (Maste's thesis, Universidade de Lisboa Faculdade Ciências). Retrieved from: <http://repositorio.ul.pt/handle/10451/15794>

Silva, A. F. G. da, Fisch, G. (2014). Avaliação do modelo WRF para a previsão do perfil do vento no centro de lançamento de alcântara. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 29(2), 259–270.

Skamarock, W. C., & Klemp, J. B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3465–3485.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., ... Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3, 125.

Smartwatt (2015). Smartwatt- Solutions for Energy Systems. Retrieved from <https://smartwatt.pt/>

Smartwatt (2018). Smartwatt- Solutions for Energy Systems. Retrieved from <https://smartwatt.pt/>





# Anexos

## Anexo I

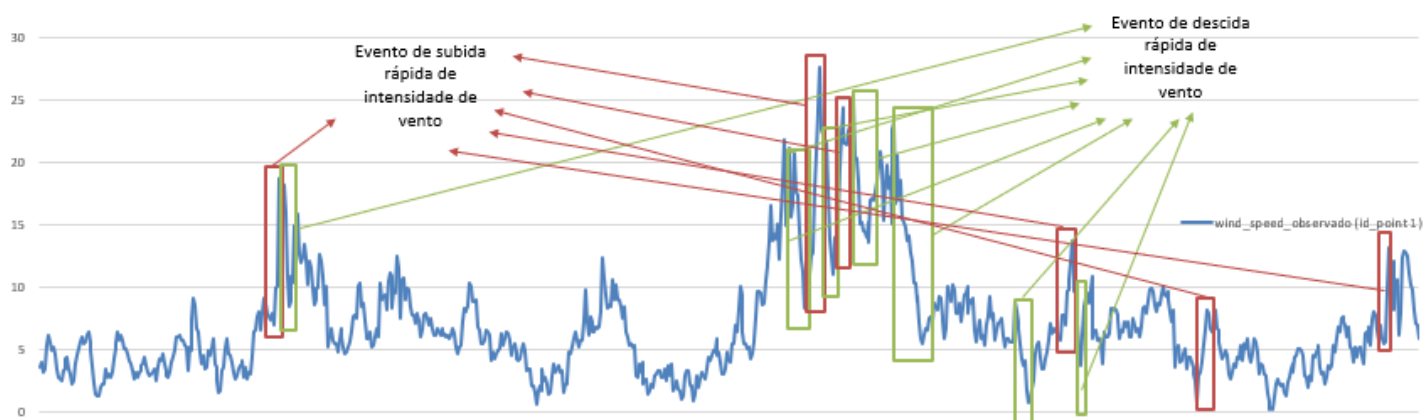


Figure I. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 1.

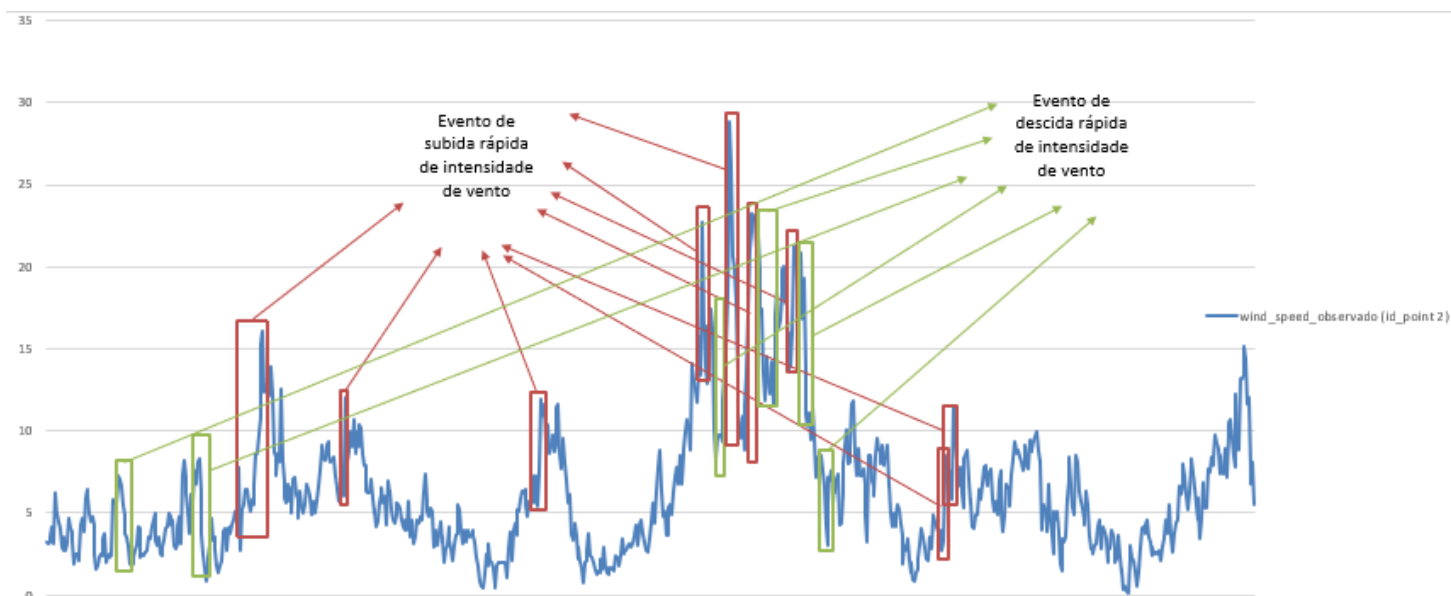


Figure II. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 2.

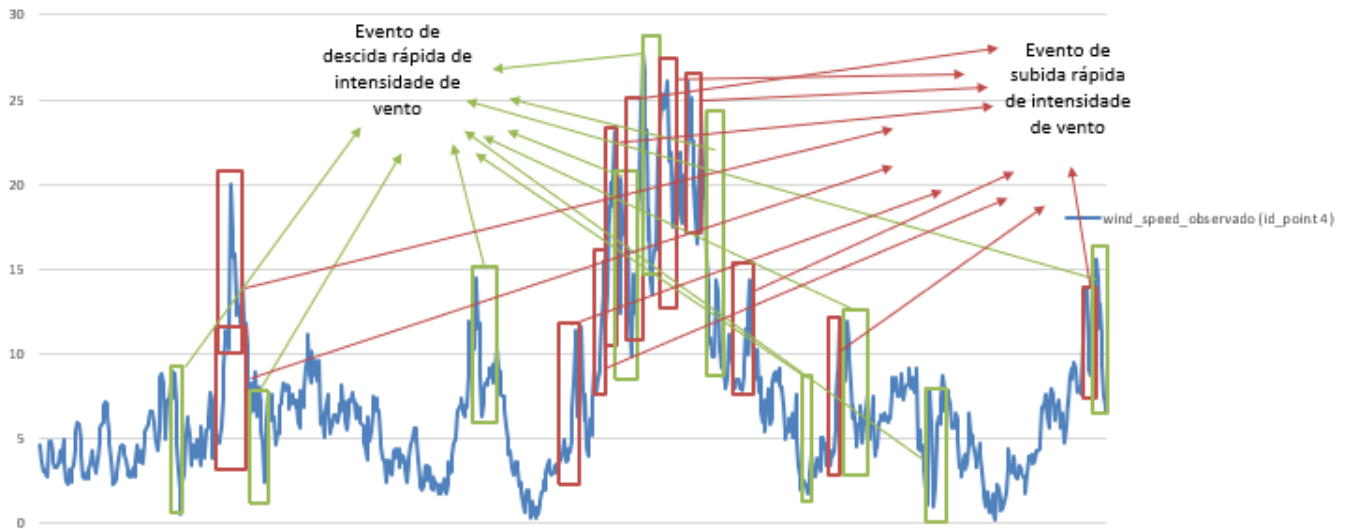


Figure III. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 4.

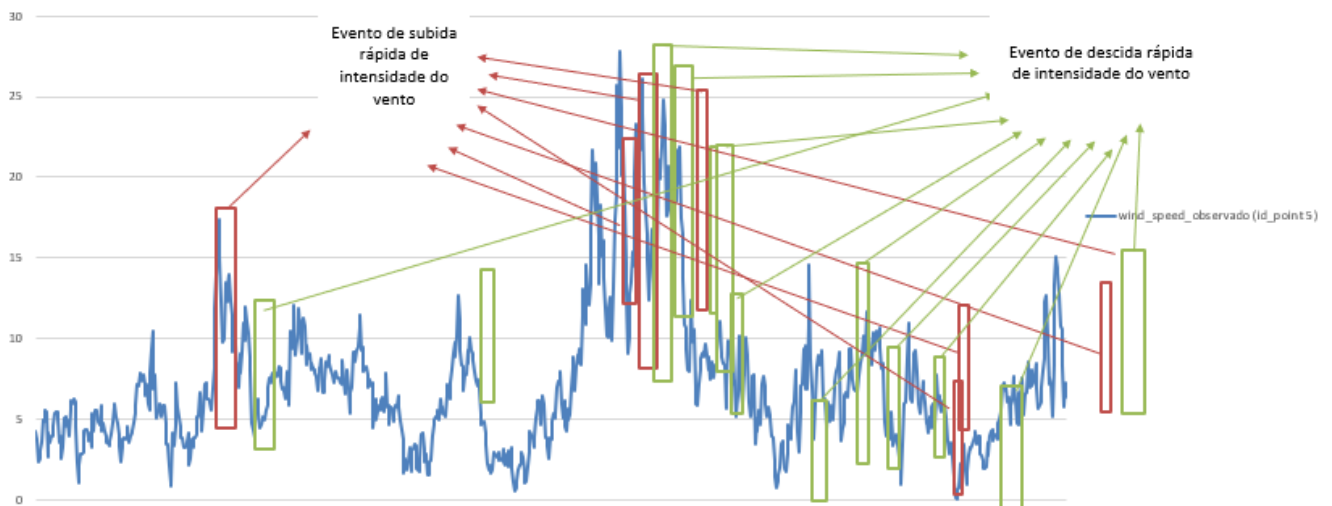


Figure IV. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 5.

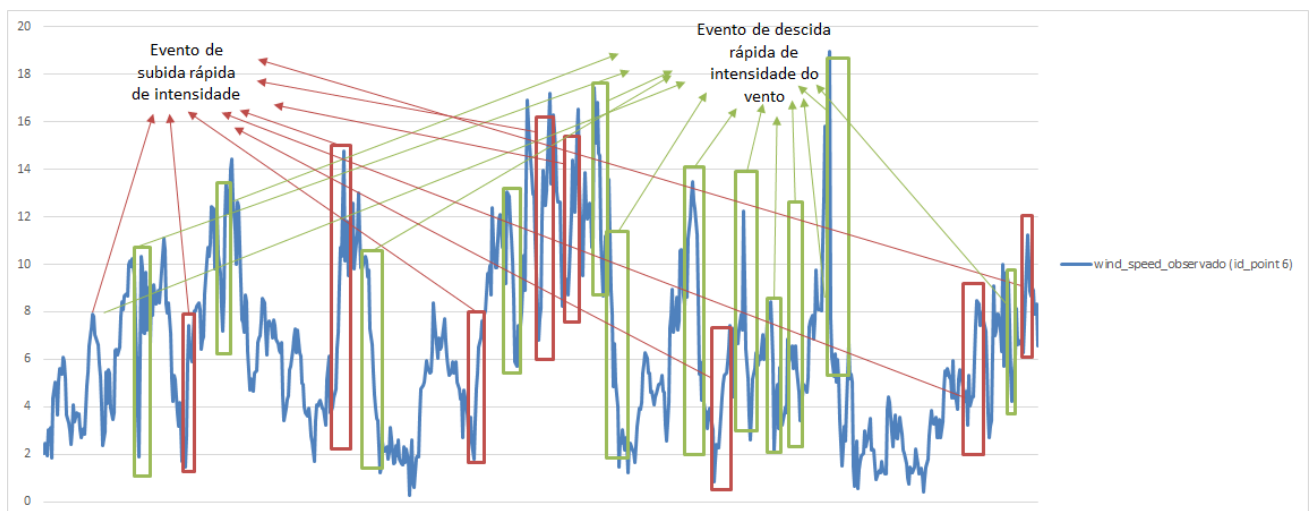


Figure V. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 6.

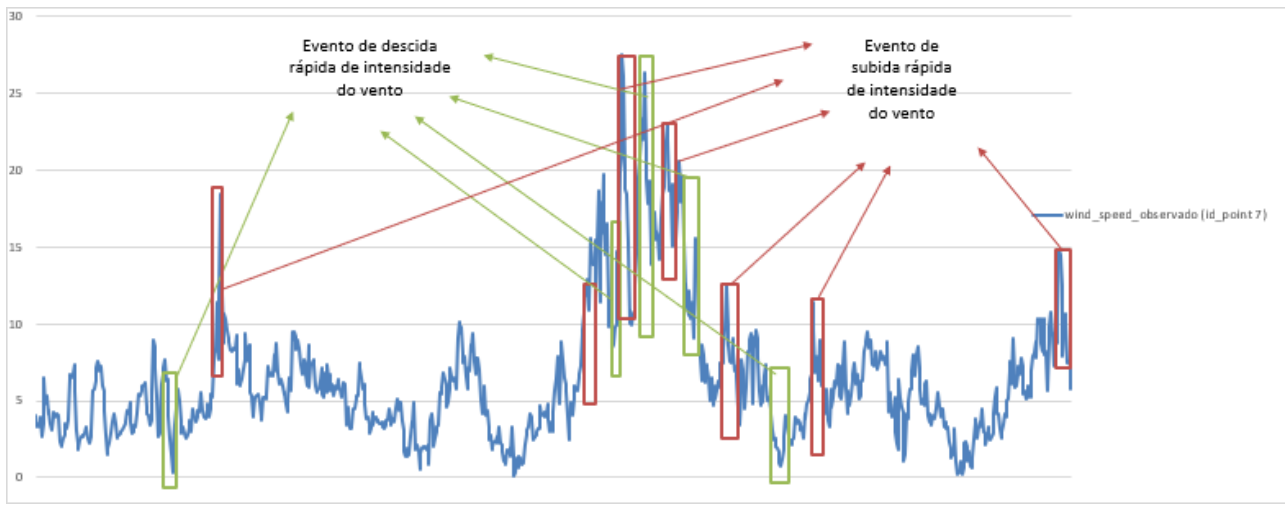


Figure VI. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 7.

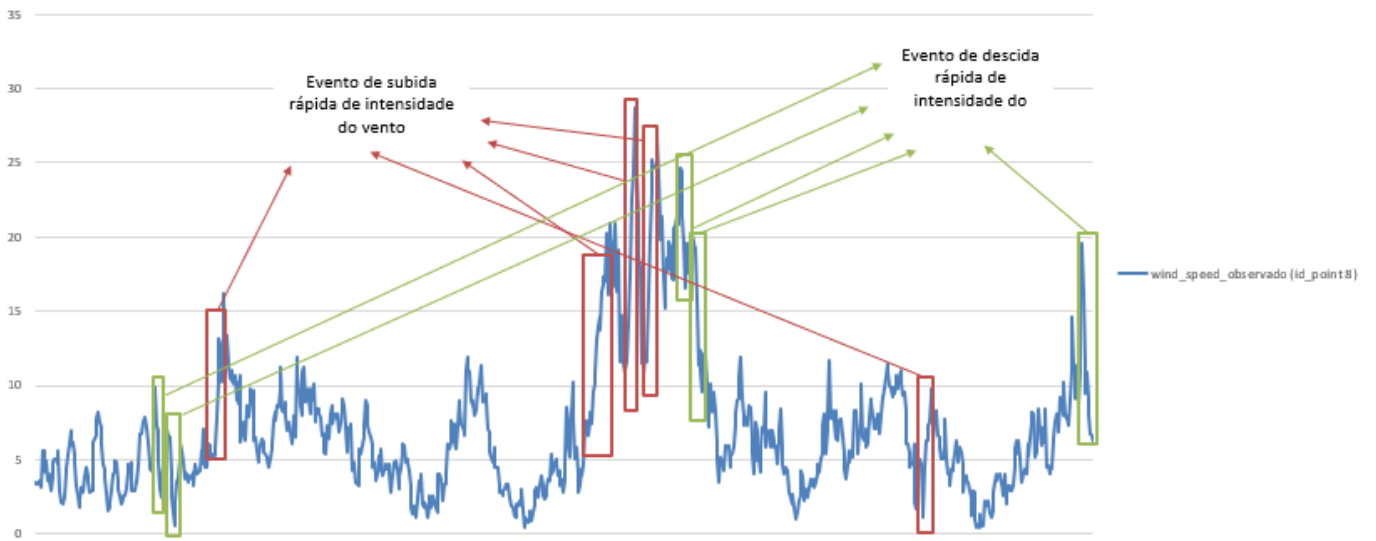


Figure VII. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 8.

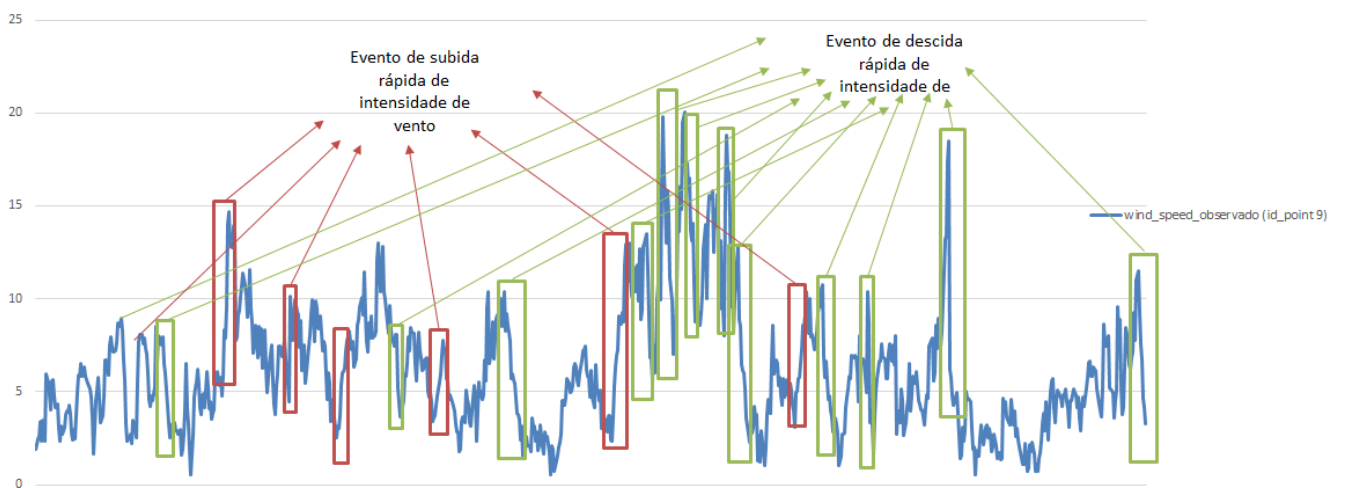


Figure VIII. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 9.

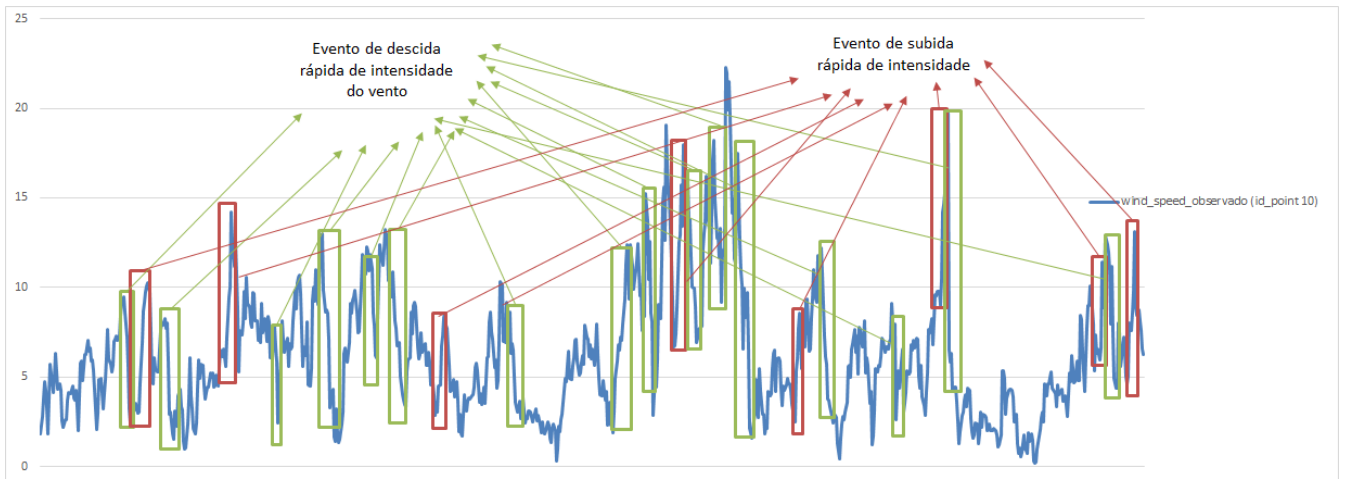


Figure IX. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 10.

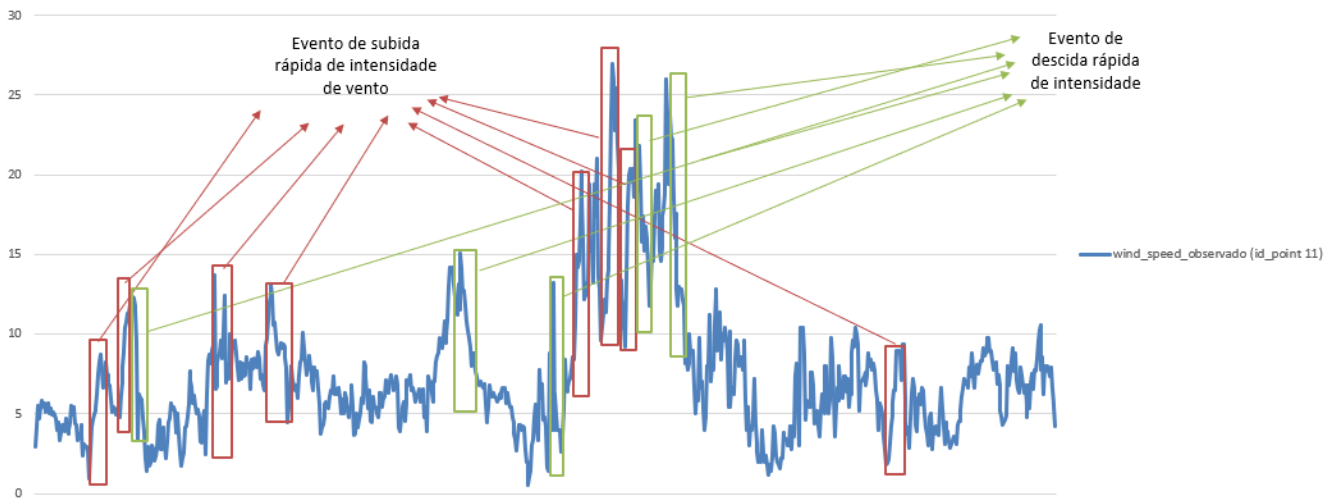


Figure X. Representação dos eventos de subidas e descidas rápidas de intensidade do vento no ponto 11.

# Anexo II

Tabela I. Cálculo do conjunto de métricas de erro para cada ponto escolhido.

id_point		RUN 1					RUN 2					RUN 3					RUN 4					RUN 5					RUN 6					RUN_CONTROL				
		bias	MAE	RMSE	MAPE	NMAPE	bias	MAE	RMSE	MAPE	NMAPE	bias	MAE	RMSE	MAPE	NMAPE	bias	MAE	RMSE	MAPE	NMAPE	bias	MAE	RMSE	MAPE	NMAPE	bias	MAE	RMSE	MAPE	NMAPE	bias	MAE	RMSE	MAPE	NMAPE
1	irie	-0,651	1,667	2,281	30,331	6,031	-0,651	1,667	2,281	30,331	6,031	-0,651	1,667	2,281	30,331	6,031	-0,651	1,667	2,281	30,331	6,031	-0,651	1,667	2,281	30,331	6,031	-0,651	1,667	2,281	30,331	6,031	-0,651	1,667	2,281	30,331	6,031
	wrf	1,211	2,161	2,779	42,099	7,820	1,046	1,996	2,573	38,686	7,223	1,256	2,157	2,782	42,059	7,806	1,200	1,996	2,549	39,032	7,222	1,044	1,925	2,419	37,288	6,966	1,039	1,928	2,421	37,331	6,978	0,406	1,832	2,451	35,128	6,631
2	irie	-0,106	1,469	1,978	36,212	5,205	-0,112	1,469	1,978	35,922	5,091	-0,112	1,469	1,978	35,922	5,091	-0,112	1,469	1,978	35,922	5,091	-0,112	1,469	1,978	35,922	5,091	-0,112	1,469	1,978	35,922	5,091	-0,112	1,469	1,978	35,922	5,091
	wrf	0,876	1,871	2,495	40,835	6,621	1,421	2,104	2,805	45,331	7,291	0,906	1,938	2,584	42,663	6,715	1,609	2,149	2,845	45,489	7,449	1,439	2,047	2,712	43,300	7,095	1,383	2,035	2,688	43,260	7,051	1,231	1,995	2,614	44,485	6,913
4	irie	-2,156	2,481	3,589	38,401	8,946	-2,161	2,482	3,590	38,259	8,951	-2,161	2,482	3,590	38,259	8,951	-2,161	2,482	3,590	38,259	8,951	-2,161	2,482	3,590	38,259	8,951	-2,161	2,482	3,590	38,259	8,951	-2,157	2,481	3,588	38,444	8,947
	wrf	0,050	2,113	2,916	44,343	7,617	0,483	1,859	2,542	40,353	6,704	-0,246	1,937	2,635	37,898	6,986	0,675	1,915	2,619	0,412	6,904	0,477	1,791	2,472	39,646	6,453	0,467	1,793	2,472	39,741	6,466	0,022	1,810	2,427	38,495	6,526
5	irie	-0,801	1,592	2,199	34,101	5,729	-0,801	1,592	2,199	34,101	5,729	-0,801	1,592	2,199	34,101	5,729	-0,801	1,592	2,199	34,101	5,729	-0,801	1,592	2,199	34,101	5,729	-0,801	1,592	2,199	34,101	5,729	-0,801	1,592	2,199	34,101	5,729
	wrf	1,438	2,159	2,870	46,538	7,770	1,334	2,040	2,685	44,241	7,342	1,374	2,134	2,840	45,230	7,679	1,613	2,171	2,847	46,245	7,811	1,369	1,991	2,616	43,003	7,163	1,357	2,005	2,618	43,330	7,216	0,836	1,801	2,360	40,570	6,480
6	irie	-0,650	1,548	2,172	37,923	8,166	-0,099	1,548	1,986	37,923	8,166	-0,099	1,548	1,986	37,923	8,166	-0,099	1,548	1,986	37,923	8,166	-0,099	1,548	1,986	37,923	8,166	-0,099	1,548	1,986	37,923	8,166	-0,019	1,581	2,014	40,170	8,338
	wrf	1,019	2,308	2,675	59,710	12,170	1,892	2,368	3,045	60,810	12,487	1,442	2,201	2,915	56,275	11,606	2,014	2,453	3,130	62,216	12,938	1,856	2,302	2,976	57,849	12,143	1,899	2,315	2,990	57,742	12,208	0,920	3,105	3,838	70,928	16,379
7	irie	-0,650	1,523	2,172	38,804	5,549	-0,650	1,523	2,172	38,804	5,549	-0,650	1,523	2,172	38,804	5,549	-0,650	1,523	2,172	38,804	5,549	-0,650	1,523	2,172	38,804	5,549	-0,650	1,523	2,172	38,804	5,549	-0,650	1,523	2,172	38,804	5,549
	wrf	1,019	2,019	2,675	53,197	7,355	1,329	2,118	2,792	56,852	7,716	0,982	2,015	2,632	50,855	7,340	1,476	2,189	2,850	57,763	7,973	1,311	2,053	2,705	56,602	7,480	1,305	2,061	2,716	56,771	7,510	0,951	1,955	2,507	53,347	7,123
8	irie	-1,228	1,782	2,648	30,096	6,215	-1,228	1,782	2,648	30,096	6,215	-1,228	1,782	2,648	30,096	6,215	-1,228	1,782	2,648	30,096	6,215	-1,228	1,782	2,648	30,096	6,215	-1,228	1,782	2,648	30,096	6,215	-1,228	1,782	2,648	30,096	6,215
	wrf	-0,066	1,996	2,640	38,182	6,961	0,341	1,974	2,601	39,487	6,887	-0,095	2,073	2,694	38,782	7,231	0,460	1,951	2,593	38,867	6,805	0,375	1,919	2,547	38,484	6,692	0,368	1,935	2,578	38,897	6,751	-0,005	1,884	2,465	37,568	6,608
9	irie	0,182	1,549	1,977	38,554	7,715	0,182	1,549	1,977	38,554	7,715	0,182	1,549	1,977	38,554	7,715	0,182	1,549	1,977	38,554	7,715	0,182	1,549	1,977	38,554	7,715	0,182	1,549	1,977	38,554	7,715	0,182	1,549	1,977	38,554	7,715
	wrf	1,416	2,308	2,986	53,954	11,497	1,898	2,487	3,170	58,518	12,390	1,210	2,174	2,844	50,787	10,830	1,964	2,567	3,266	0,608	12,791	1,846	2,420	3,097	56,537	12,057	1,895	2,424	3,112	56,515	12,078	1,889	2,445	3,161	58,906	12,182
10	irie	0,103	1,883	2,427	48,490	8,444	0,103	1,883	2,427	48,490	8,444	0,103	1,883	2,427	48,490	8,444	0,103	1,883	2,427	48,490	8,444	0,103	1,883	2,427	48,490	8,444	0,103	1,883	2,427	48,490	8,444	0,103	1,883	2,427	48,490	8,444
	wrf	0,446	2,064	2,764	55,624	9,260	1,333	2,280	2,997	63,213	10,229	0,290	2,038	2,689	53,112	10,229	1,416	2,356	2,689	66,367	10,567	1,306	2,240	2,945	63,069	10,047	1,367	2,238	2,962	63,169	10,040	1,369	2,329	3,064	66,650	10,447
11	irie	-0,046	1,870	2,675	30,675	6,926	-0,046	1,870	2,675	30,675	6,926	-0,046	1,870	2,675	30,675	6,926	-0,046	1,870	2,675	30,675	6,926	-0,046	1,870	2,675	30,675	6,926	-0,046	1,870	2,675	30,675	6,926	-0,046	1,870	2,675	30,675	6,926
	wrf	0,332	2,328	3,188	39,721	8,621	0,878	2,347	3,062	42,154	8,693	0,375	2,380	3,281	40,430	8,813	1,012	2,487	3,223	43,866	9,210	0,827	2,389	3,161	43,159	8,849	0,828	2,355	3,105	42,700	8,721	1,263	2,582	3,249	47,222	9,565