

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico da UFSC
Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica



Gabriel Löfgren Lobo

Análise de parametrização do modelo WRF para previsão de
geração eólica no Nordeste brasileiro

Florianópolis

2022

Gabriel Löfgren Lobo

**Análise de parametrização do modelo WRF para
previsão de geração eólica no Nordeste brasileiro**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Orientador: Prof. Erlon Cristian Finardi, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico da UFSC
Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica

Florianópolis
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lobo, Gabriel Löfgren

Análise de parametrização do modelo WRF para previsão de
geração eólica no Nordeste brasileiro / Gabriel Löfgren Lobo
; orientador, Erlon Cristian Finardi, 2022.

44 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Eólica. 3. WRF. I. Cristian
Finardi, Erlon. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Gabriel Löfgren Lobo

Análise de parametrização do modelo WRF para previsão de geração eólica no Nordeste brasileiro

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica.

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica

Comissão Examinadora

Prof. Erlon Cristian Finardi, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador

Roilan Hernandez, Me
ENGIE

Prof. Reinaldo Haas, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 22 de dezembro de 2022

Dedico este trabalho a todos aqueles que, de alguma forma,
auxiliaram para a concretização desta etapa.

Agradecimentos

Agradeço a UFSC pela excelência de ensino.

Agradeço o Erlon, pela orientação e confiança depositada na minha proposta de projeto.

Agradeço meu pai e minha mãe pelo apoio, orientação e amor incondicional em toda a minha vida.

Agradeço a Emily, por ser a melhor irmã que alguém possa ter.

Agradeço a Isa, minha melhor amiga, companheira e namorada.

Agradeço toda a minha maravilhosa família que enche meu coração de gratidão.

Aos grandes amigos conquistados durante a vida, em especial Bernando, Diego, Fejão, Lucas, Luiz Augusto, Marcos, Mayer e Rafael.

*"What use is it to me to be able to divide a piece of land into equal areas if I'm unable to
divide it with a brother"*
(Lucius Annaeus Seneca)

Resumo

O objetivo deste trabalho é a análise de diferentes parâmetros do Weather Research and Forecasting Model (WRF) para a previsão da velocidade do vento (e por consequência, a geração eólica) na região Nordeste do Brasil. Para atingir este objetivo, são comparados seis cenários de diferentes configurações, assim como dados reais coletados por uma torre anemométrica e o próprio modelo de previsão climática, que é utilizado como dados de entrada para o WRF. Devido a restrições computacionais e disponibilidade de dados reais, o estudo foi restringido à primeira semana de abril de 2021. Os índices estatísticos escolhidos são: A raiz quadrada do erro médio (RMSE), erro percentual médio absoluto (MAPE), erro médio (BIAS) e a média. No melhor cenário, o WRF foi capaz de prever a potência total disponível no período de estudo com um erro de apenas 4%. Por isso, o modelo provou-se uma ferramenta poderosa para a previsão da velocidade do vento.

Palavras-Chave: 1. Eólica. 2. Previsão. 3. WRF. 4. Modelagem numérica. 5.

Nordeste.

Abstract

This work aims to analyze different parameters of the Weather Research and Forecasting Model (WRF) for predicting of wind speed (and consequently, wind generation) in the northeast region of Brazil. Six scenarios of different configurations were compared, as well as real data collected by an anemometric tower and the climate forecast model itself, which is used as input data for the WRF. Due to computational restrictions and the availability of real data, the study was restricted to the first week of April 2021. The statistical indices chosen were: The Root Mean Error Squared (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and bias. In the best scenario, the WRF can predict the total power available in the study period with an error of only 4%. Therefore, the model proved a powerful tool for predicting wind speed.

Keywords: 1. Eolic. 2. Prediction. 3. WRF. 4. Numeric modelling. 5. Northeast.

Lista de figuras

Figura 1 – Grade vertical da coordenada sigma	17
Figura 2 – Grade vertical da coordenada ETA	17
Figura 3 – Representação da CLA	18
Figura 4 – Exemplo de seleção de domínios	21
Figura 5 – Cenário 1	28
Figura 6 – Cenário 2	29
Figura 7 – Cenário 3	31
Figura 8 – Cenário 4	32
Figura 9 – Cenário 5	33
Figura 10 – Cenário 6	35
Figura 11 – Cenário 7	36
Figura 12 – Comparação GFS	37
Figura 13 – Cenário 6 em agosto	39

Lista de tabelas

Tabela 1 – CONUS Suite	23
Tabela 2 – Tropical Suite	24
Tabela 3 – Período de estudo	25
Tabela 4 – Cenário 1	27
Tabela 5 – Métricas Cenário 1	28
Tabela 6 – Cenário 2	29
Tabela 7 – Métricas Cenário 2	29
Tabela 8 – Cenário 3	30
Tabela 9 – Métricas Cenário 3	31
Tabela 10 – Cenário 4	32
Tabela 11 – Cenário 5	32
Tabela 12 – Métricas Cenário 4	33
Tabela 13 – Métricas Cenário 5	33
Tabela 14 – Cenário 6	34
Tabela 15 – Métricas Cenário 6	35
Tabela 16 – Cenário 7	35
Tabela 17 – Métricas Cenário 7	36
Tabela 18 – Métricas Cenário 6 e GFS	37
Tabela 19 – Potência total observada por unidade de área	38
Tabela 20 – Diferenças de potencias totais	38
Tabela 21 – Período de validação	38
Tabela 22 – Métricas Cenário 6 em abril e agosto	39
Tabela 23 – Todas as métricas dos cenários	40

Lista de Siglas e Abreviaturas

AFWA	<i>Air Force Weather Agency</i>
AGL	<i>Altura acima do nível do solo</i>
BIAS	<i>Erro médio</i>
CLA	<i>Camada limite atmosférica</i>
CFS	<i>Climate Forecast System</i>
CI	<i>Comissão de Infraestrutura</i>
MAPE	<i>Erro percentual médio absoluto</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
GFS	<i>Global Forecast System</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NWS	<i>National Weather Service</i>
NMM	<i>Nível médio do mar</i>
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i>
P	<i>Potência</i>
RMSE	<i>Raiz quadrada do erro médio</i>
SODAR	<i>Sonic Detection and Ranging</i>
UCAR	<i>University Corporation for Atmospheric Research</i>
WRF	<i>Weather Research & Forecasting Model</i>
WPS	<i>WRF Pre-Processing System</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	Coordenadas de pressão	16
2.2	Camada limite atmosférica	18
2.3	Componentes do vento	19
2.4	Energia do vento	19
2.5	GFS	20
2.6	O modelo WRF	20
2.6.1	Domínios	21
3	METODOLOGIA	22
3.1	Obtenção dos dados observados	22
3.2	Biblioteca wrf-python	22
3.3	Parâmetros analisados	23
3.3.0.1	NCAR Convection-Permitting Suite	23
3.3.0.2	NCAR Tropical Suite	24
3.4	Execução do modelo	24
3.5	Período de estudo	24
3.6	Métodos estatísticos	25
3.6.1	Raiz quadrada do erro médio (RMSE)	25
3.6.2	Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE)	25
3.6.3	Erro médio (BIAS)	25
3.6.4	Média	26
4	RESULTADOS	27
4.1	Cenários	27
4.1.1	Execução padrão	27
4.1.2	Resolução do GFS	29
4.1.3	Resolução dos domínios	30
4.1.4	Número de domínios	31
4.1.5	Suites físicas	34
4.2	Comparação com previsão original (GFS)	36

4.3	Potência total disponível	37
4.3.1	Validação do resultado	38
5	CONCLUSÕES	40
6	PESQUISAS FUTURAS	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 Introdução

De 2010 a 2022, o potencial eólico instalado no Brasil cresceu de 928 MW para 22.000 MW, sendo que 7.000 MW foram instalados nos últimos 3 anos[1]. Com isso, a energia eólica já representa 12% da capacidade total instalada no Brasil, com 812 parques eólicos distribuídos em 12 estados. No Brasil, o vento é muito favorável para a geração eólica devido a diversos fatores, como consistência, baixa variância na direção e velocidade estável[2]. Além disso, a Comissão de Infraestrutura (CI) aprovou no ano de 2022 um projeto regulatório para a exploração da energia offshore[3], que deve acelerar ainda mais o crescimento desta fonte energética no país.

Este crescimento exponencial da energia eólica no Brasil está tornando-a cada vez mais relevante no planejamento e operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), tanto que os modelos de precificação do preço da energia estão ampliando sua consideração das incertezas do vento em suas novas versões. Isso traz uma grande importância para a previsibilidade do vento em parques eólicos nacionais.

O modelo WRF é capaz de realizar simulações físicas em áreas determinadas pelo usuário com intuito de aprimorar modelos de previsões climáticas já existentes, como o Global Forecast System (GFS), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Climate Forecast System (CFS) entre outros.

Neste estudo, são analisados diferentes parâmetros do modelo que podem ser alterados para melhorar a previsão da velocidade do vento na altura dos hubs de aerogeradores no Nordeste brasileiro. Com intuito de verificar a sensibilidade dos parâmetros do modelo, uma comparação entre diferentes configurações foi feita levando em consideração dados reais coletados por uma torre anemométrica tanto quanto os dados de previsões do modelo GFS.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho consiste em realizar previsões da velocidade do vento mais precisas do que o modelo global GFS. São feitas diversas previsões com configurações diferentes no mesmo período e determinar qual é a mais precisa.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

-
- Determinar quais parâmetros do modelo WRF podem ser configurados para melhorar a previsão.
 - Analisar e comparar cada conjunto de configurações.
 - Comparar cada previsão com os dados observados.
 - Comparar as previsões do WRF com a previsão original do GFS para determinar a melhoria com as simulações.
 - Analisar a diferença entre a potência total disponível dos dados observados e as previstas.

2 Revisão de Literatura

Nesta seção são apresentados fundamentos teóricos a respeito de meteorologia, energia eólica e o modelo WRF, com objetivo de apresentar informações e conceitos importantes para a compreensão do trabalho.

2.1 Coordenadas de pressão

As equações de movimento são mais facilmente representadas em coordenadas de pressão. Por isso, os modelos de previsão climática utilizam níveis de pressão para representar a coordenada vertical[4].

Infelizmente, o sistema de coordenadas de pressão não é adequado para resolver equações de previsão, assim como superfícies de altura, pois pode atravessar montanhas e por consequência, desaparecer do domínio de previsão.

Para resolver este problema, Phillips (1957) desenvolveu um sistema de coordenadas que acompanha a elevação do terreno, denominada de coordenada sigma (σ). A coordenada sigma é utilizada em vários modelos de previsão, como GFS, ECMWF e MM5 e pode ser definida pela seguinte equação:

$$\sigma = \rho/\rho_s \tag{2.1}$$

Em que ρ é a pressão em um nível de previsão dentro do modelo e p_s é a pressão na superfície da Terra, i.e., não necessariamente no nível médio do mar (NMM).

A coordenada mais baixa acompanha o solo, enquanto as superfícies sigma gradualmente passam de quase paralelas ao terreno na parte inferior do modelo ($\sigma = 1$) para quase horizontais à superfície de pressão constante no topo do modelo ($\sigma = 0$), conforme ilustrado na Figura 1.

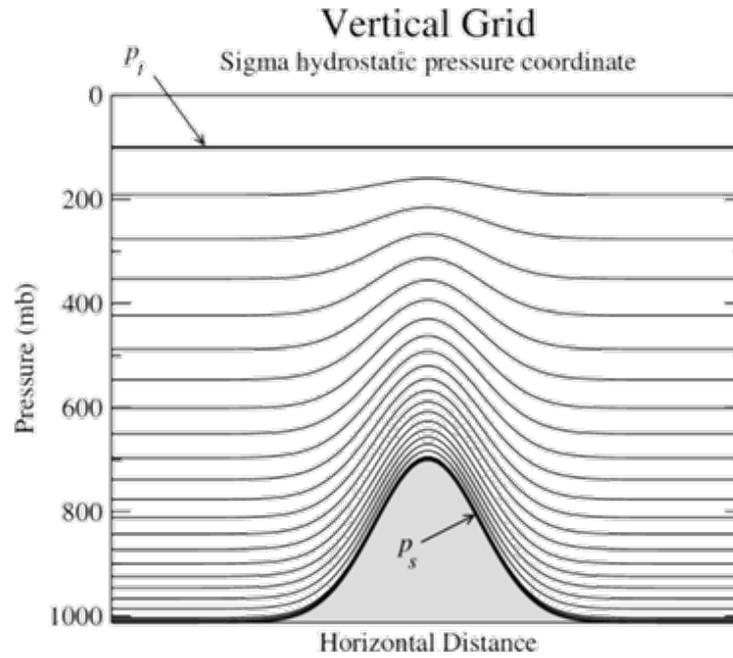


Figura 1 – Grade vertical da coordenada sigma

O modelo WRF utiliza um sistema de coordenadas muito parecido com o sigma: as coordenadas ETA (η). Este sistema foi adotado com intuito de reduzir os erros no cálculo do gradiente de pressão. As coordenadas ETA utilizam o NMM como nível de referência inferior, em vez da pressão da superfície da terra. Assim, o ETA é definido como:

$$\eta_s = \frac{P_r(z_s) - P_t}{P_r(z = 0) - P_t} \quad (2.2)$$

Em que P_t é a pressão no topo do modelo, $P_r(z = 0)$ é a pressão padrão do NMM (1013 hPa), $P_r(z_s)$ é a pressão atmosférica padrão do terreno no nível z_s .

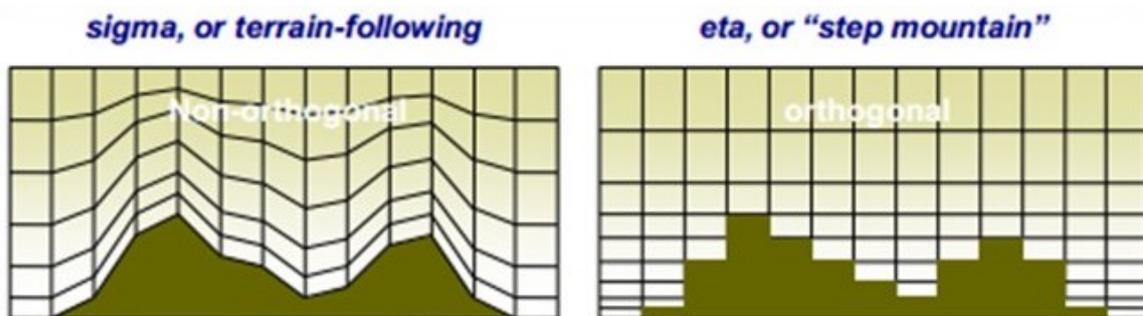


Figura 2 – Grade vertical da coordenada ETA

Nota-se na Imagem 2 que os níveis ETA são predefinidos e a topografia do modelo é definida para a superfície ETA mais próxima, mesmo que não corresponda ao terreno médio na caixa de grade.

O ETA geralmente é rotulado de 0 a 1 do topo do domínio do modelo até o nível do mar. A vantagem deste sistema é que ele permite que a camada atmosférica inferior

do modelo possa ser representada dentro da grade como uma "etapa" plana, em vez de inclinada como o sistema sigma em terrenos íngremes.

2.2 Camada limite atmosférica

A camada limite atmosférica (CLA) é definida pela camada mais baixa da região atmosférica, que é diretamente afetada pelas propriedades da superfície terrestre, seja pela rugosidade, mudança de temperatura ou até mesmo a umidade. Acima da CLA, encontra-se a atmosfera livre, em que os efeitos da superfície têm muita pouca influência nas condições climáticas[5].

A propriedade da CLA com maior relevância no estudo eólico é a fricção aerodinâmica do ar com o atrito superfície.

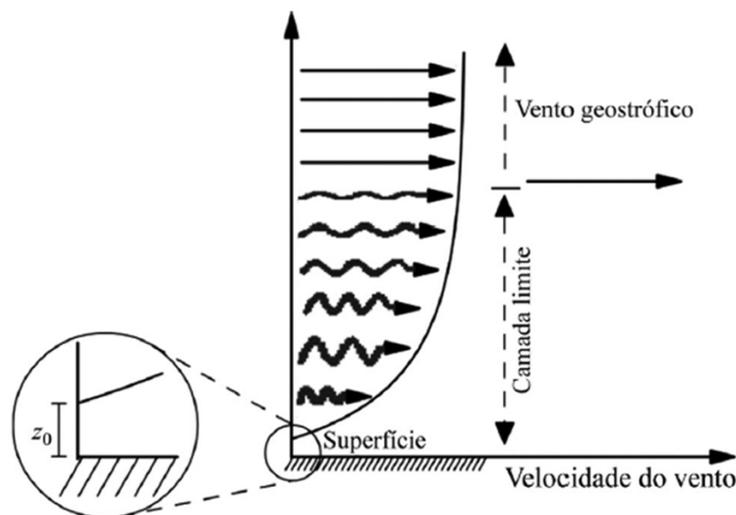


Figura 3 – Representação da CLA

Como pode-se observar na Figura 3, a velocidade do vento aumenta conforme a distância do solo. Este comportamento deve-se ao fato de o vento encontrar menos resistência aerodinâmica em alturas mais elevadas.

Para determinar a velocidade média do vento em uma determinada altura, pode-se utilizar a Lei Logarítmica do Perfil do Vento [6], definida por:

$$w(z) = \frac{w_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) + \psi(z, z_0, L) \right] \quad (2.3)$$

Onde $w(z)$ é a velocidade do vento na altura z , w_* é a velocidade de cisalhamento (atrito), k é a constante de von Karman (0,4), d é o deslocamento no plano zero (altura acima do solo em que a velocidade zero do vento é alcançada devido à obstáculos), z_0 é a rugosidade da superfície (entre 1/10 e 1/30, dependendo da superfície) e ψ é o termo de estabilidade, onde L é o parâmetro de estabilidade de Monin-Obukhov.

A Lei Logarítmica do Perfil do Vento é mais comumente utilizada para alturas mais baixas da atmosfera, até aproximadamente 100 metros acima do solo. Para alturas mais elevadas, a Lei da Potência produz previsões mais precisas da velocidade média do vento, sendo definida pela seguinte equação:

$$\frac{w}{w_r} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (2.4)$$

Em que w é a velocidade do vento a uma altura z , w_r é a velocidade do vento conhecida a uma altura específica de referência z_r e o α é um coeficiente empírico que depende da estabilidade atmosférica. Em condições de estabilidade, α equivale a $1/7$.

2.3 Componentes do vento

Como o vento é um vetor, este pode ser decomposto em duas componentes, geralmente descritas pelas letras u e v [7]:

- u : Componente Zonal (eixo horizontal)
- v : Componente Meridional (eixo vertical)

Dadas ambas as componentes, é possível calcular a magnitude da velocidade do vento com o teorema de Pitágoras:

$$w = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.5)$$

2.4 Energia do vento

A energia eólica é a energia cinética do ar em movimento [8]. A energia total passando por uma superfície imaginária de área A durante um determinado tempo t pode ser descrita por:

$$E = \frac{1}{2} A t \rho w^3 \quad (2.6)$$

Em que ρ é a densidade do ar e w é a velocidade média do vento.

A potência do vento é a energia por unidade de tempo, então a potência do vento incidente em uma área A [6] pode ser calculada por:

$$P = \frac{1}{2} A \rho w^3 \quad (2.7)$$

Onde P é a potência em $[W]$.

É possível também representar a potência por unidade de área[6] reajustando a fórmula anterior para:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2}\rho w^3 \quad (2.8)$$

Pode-se observar que a densidade de energia é proporcional à densidade do ar, que equivale a $1,225 \text{ kg/m}^3$ para as condições normais de NMM e $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Também é possível notar que a potência é diretamente proporcional à velocidade do vento ao cubo, essa relação traz uma grande importância à acurácia das previsões eólica, já que pequenos erros são gravemente amplificados.

2.5 GFS

O Global Forecast System (GFS) é um sistema global de previsão numérica do tempo que contém um modelo global de computador e análise variacional. Ele é executado pelo Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos (NWS) e gera dados para dezenas de variáveis atmosféricas e terrestres, incluindo temperaturas, ventos, precipitação, umidade do solo e concentração de ozônio atmosférico[9].

O GFS é executado quatro vezes ao dia e fornece uma previsão com um horizonte de 16 dias, mas com resolução espacial (distância entre pontos de dados) diminuída após 10 dias (resolução horizontal básica de 28 quilômetros até o décimo dia e 70 quilômetros após).

2.6 O modelo WRF

O Modelo de Pesquisa e Previsão do Tempo (WRF) é um sistema de previsão de tempo numérico de mesoescala projetado para pesquisa atmosférica e aplicações de previsão operacional[10]. Ele é desenvolvido principalmente pelo National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Centers for Environmental Prediction (NCEP), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e Air Force Weather Agency (AFWA).

O WRF é capaz de realizar simulações atmosféricas a partir de dados reais (observados) ou de previsões climáticas (modelos como GFS), levando em consideração todas as características físicas da região. O WRF é extensivamente usado para pesquisas e previsões em tempo real em todo o mundo. Ele utiliza um modelo de previsão meteorológica como condições de contorno para gerar um resultado ainda mais refinado e com uma resolução maior do que os dados de entrada. No caso deste estudo, foi utilizado o modelo GFS para as condições de contorno, já que é um modelo bem popularmente utilizado pelos usuários do WRF e é desenvolvido pelo próprio NCEP.

A vantagem de utilizar o WRF em vez dos dados puros do modelo GFS é que é possível obter um resultado muito mais coerente com o local selecionado, além de ser pos-

sível aumentar consideravelmente a resolução espacial. No caso deste estudo, foi possível aumentar a resolução original de 28km até no máximo 0.333km.

O sistema WRF é dividido em duas etapas: o WRF Pre-Processing System (WPS), responsável por tratar os dados de entrada para a simulação, e próprio modelo WRF que executa as simulações. Tanto o WPS quanto o WRF possuem arquivos de configuração para suas respectivas execuções. Mais especificamente, o arquivo “namelist.wps” para o WPS e “namelist.input” para o WRF. Ambas as configurações foram feitas com base em seus respectivos guias de boas práticas, disponíveis no site da UCAR[11][12].

2.6.1 Domínios

A configuração da região de simulação do WRF é feita a partir de domínios (áreas), com quais é possível realizar o “aninhamento” dos mesmos[13]. Como mencionado anteriormente, não é possível divulgar a região de estudo, por isso, foi feita uma simulação da seleção dos domínios na região leste da Ásia para exemplificar:

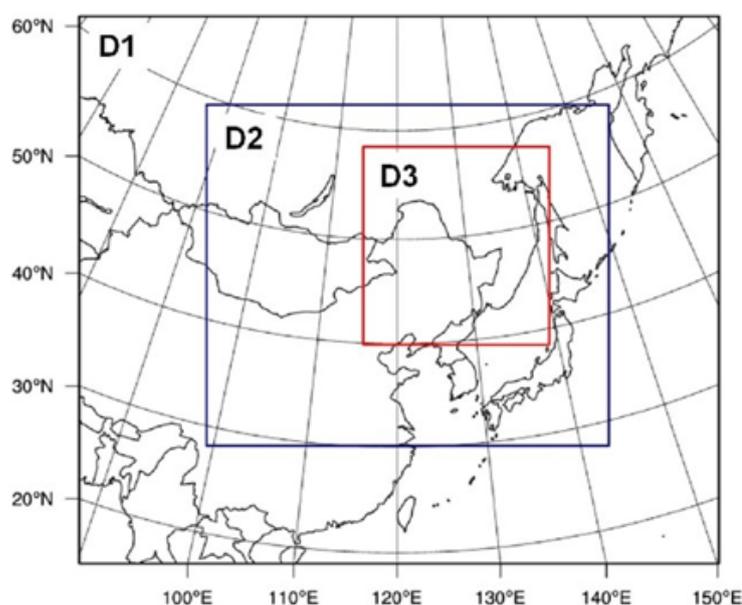


Figura 4 – Exemplo de seleção de domínios

É possível identificar 3 domínios na Figura 4: D1, D2 e D3. Sendo o primeiro domínio parente do segundo, que por sua vez, parente do terceiro. Na configuração do modelo, é possível determinar a resolução dos pontos de grade de simulação de cada um deles. A UCAR recomenda que a razão entre um domínio e seu parente seja de 3:1 para que se obtenha a melhor performance e acurácia dos resultados[12], assim como manter a estabilidade do programa. Por exemplo, em uma configuração de 3 (três) domínios, caso seja especificado que o primeiro domínio tenha 9km de resolução, os domínios 2 e 3 devem ter, respectivamente, 3km e 1km de resolução.

3 Metodologia

3.1 Obtenção dos dados observados

O estudo teve como objetivo utilizar o modelo WRF para realizar previsões da velocidade do vento na altura média de aerogeradores (80-100m) e comparar com dados reais. Para isso, foi necessário obter dados coletados na altura mencionada. A obtenção dos dados não é uma tarefa trivial, já que esses dados são geralmente obtidos através da instalação de grandes torres anemométricas ou equipamentos ainda mais caros, como sistemas LIDAR (Light Detection And Ranging) ou SODAR (Sonic Detection and Ranging) para realizar as medições. Por causa deste alto custo, empresas geralmente não divulgam esse tipo de dados.

Para resolver este problema, foi necessário buscar empresas dispostas a disponibilizá-los para a realização deste trabalho. Felizmente, a obtenção desses dados foi possível através de uma empresa, que disponibilizou o histórico de 1 (um) ano de dados meteorológicos coletados através da uma torre anemométrica nas alturas de 80m, 95m, 100m, 115m e 120m. O conjunto de dados inclui diversas variáveis meteorológicas como temperatura, pressão, altura, componente u e v do vento entre outras.

Contudo, para respeitar o sigilo dos dados, algumas condições foram estabelecidas para a publicação do trabalho:

- A empresa deve permanecer anônima;
- O local da coleta dos dados não deve ser divulgado;
- Foram disponibilizados apenas os meses pares do ano de 2021;

Em razão da restrição da especificação do local de estudo, o foco do trabalho foi generalizado à região do Nordeste brasileiro.

3.2 Biblioteca wrf-python

Para extrair e interpretar os dados de saída do modelo WRF, foi utilizada a linguagem Python em um ambiente do Anaconda configurado com a biblioteca wrf-python[14]. Ela é uma biblioteca desenvolvida pela própria NCAR que compõe uma coleção de rotinas de diagnóstico e interpolação para uso com os dados de saída do WRF. Com a biblioteca, foi possível realizar a conversão da componente vertical dos dados (em níveis de pressão ETA) em altura acima do nível do solo (AGL) e por fim, a interpolação vertical para o nível de altura dos dados coletados (80m).

3.3 Parâmetros analisados

Objetificando melhorar os resultados das previsões do modelo WRF, foi realizado um estudo de sua configuração para determinar um conjunto de parâmetros que podem ser alterados visando tal melhoria.

O primeiro parâmetro a ser analisado foi os dados de entrada do modelo, mais precisamente o modelo de previsão GFS. O modelo possui duas versões, uma com resolução de 0.25° e outra de 0.5° . As previsões do GFS são disponíveis publicamente para baixar no site da NOAA[15]. A partir dos dados baixados, pode-se executar o pré-processamento (WPS) para gerar os dados necessários para a simulação do WRF. Com ambas as resoluções, foi testado se um aumento na resolução espacial das condições de contorno teria algum impacto significativo na previsão final.

Também foram testadas diferentes configurações de domínios e resoluções. A quantidade de domínios variou entre 2, 3 e 4 e a resolução dos primeiros domínios variou entre 15km e 9km. Com essas variações, foi avaliado se um aumento do número de domínios ou da resolução teria alguma melhoria na acurácia da previsão.

No arquivo de configurações do WRF (namelist.wrf), pode ser configurado diversas opções de representação matemática das condições físicas da região. Os esquemas de parametrização física incluem: microfísica, superfície da terra, nuvens, superfície urbana, camada limite planetária, entre outros. A análise de cada uma das parametrizações físicas foge do escopo deste trabalho, por isso, foram analisadas apenas dois “suites” de parametrização pré-configuradas do WRF. Um suite é um conjunto de opções de física que funciona bem em conjunto para uma determinada aplicação[16]. As suites podem oferecer orientação aos usuários na aplicação do WRF, melhorar a compreensão do desempenho do modelo e facilitar o avanço do modelo. As duas suites e suas configurações utilizadas e foram:

3.3.0.1 NCAR Convection-Permitting Suite

Parâmetro	Nome	Configuração
Microphysics	Thompson	mp_physics=8
Cumulus	Tiedtke	cu_physics=6
Longwave radiation	RRTMG	ra_sw_physics=4
Shortwave radiation	RRTMG	ra_lw_physics=4
Boundary layer	MYJ	bl_pbl_physics=2
Surface layer	MYJ	sf_sfclay_physics=2
Land surface	Noah LSM	sf_surface_physics=2

Tabela 1 – CONUS Suite

3.3.0.2 NCAR Tropical Suite

Parâmetro	Nome	Configuração
Microphysics	WSM6	mp_physics=6
Cumulus	new Tiedtke	cu_physics=16
Longwave radiation	RRTMG	ra_sw_physics= 4
Shortwave radiation	RRTMG	ra_lw_physics= 4
Boundary layer	YSU	bl_pbl_physics=1
Surface layer	MYJ	sf_sfclay_physics=19
Land surface	Noah	sf_surface_physics= 2

Tabela 2 – Tropical Suite

As tabelas 1 e 2 representam o nome de cada parâmetro configurado pela suite, o nome da configuração selecionada pro parâmetro e a sua respectiva configuração no arquivo “namelist.input”.

3.4 Execução do modelo

Como o modelo WRF é muito dinâmico, é necessário compila-lo na máquina que irá utilizá-lo. Para isso, foram instaladas todas as bibliotecas necessárias e configurado devidamente para habilitar sua execução em paralelo, aproveitando todos os núcleos do processador. O modelo foi instalado em um computador pessoal rodando Linux Ubuntu 20.04 (vale ressaltar que não foi possível executar na versão 22.04). A máquina conta com um processador Ryzen 5 3600, com 6 núcleos e 12 threads, assim como 16gb de RAM.

O WRF é altamente escalável com o número de processadores lógicos do sistema[17]. Portanto, para otimizar o tempo de execução, recomenda-se executá-lo em clusters com processadores de última geração. Como este trabalho possui caráter científico e o preço de execução na nuvem é muito alto, não foi considerado necessário, apesar do longo tempo de execução.

3.5 Período de estudo

Devido as restrições dos dados fornecidos pela empresa e pela demanda computacional do WRF, o estudo foi restringido arbitrariamente para a primeira semana de abril de 2021. O período de sete dias foi escolhido para coincidir com o horizonte de previsão de geração eólica do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)[18]. O modelo WRF foi configurado para produzir resultados com periodicidade horária. Como os dados reais foram coletados em intervalos de 10min, foi necessário um pré-processamento dos dados para convertê-los em séries horárias.

Início	01/04/2021 00:00
Fim	08/04/2021 00:00

Tabela 3 – Período de estudo

3.6 Métodos estatísticos

Para avaliar quantitativamente os resultados das simulações, foram utilizadas 5 métricas:

3.6.1 Raiz quadrada do erro médio (RMSE)

O RMSE representa a raiz quadrada das diferenças entre os valores previstos e os valores observados ou a média quadrática dessas diferenças. Ele é representado pela seguinte fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (3.1)$$

Em que O_i é o valor observado, P_i o valor simulado e N o tamanho da amostra.

O RMSE é frequentemente usado para medir as diferenças entre os valores previstos por um modelo ou estimador e os valores observados[19]. Seu resultado é sempre não negativo, e um valor de 0 indicaria um ajuste perfeito aos dados. Em geral, um RMSE mais baixo é melhor do que um mais alto.

3.6.2 Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE)

O erro percentual absoluto médio é uma medida de erro relativo que usa valores absolutos para impedir que os erros positivos e negativos cancelem uns aos outros e usa erros relativos para permitir que você compare a precisão da previsão entre métodos de série de tempo.[20]

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \quad (3.2)$$

3.6.3 Erro médio (BIAS)

O BIAS é a diferença entre o valor esperado desse estimador e o valor real do parâmetro que está sendo estimado[21]. Um estimador ou regra de decisão com viés zero é chamado de unbiased. Ele pode ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i \quad (3.3)$$

Um BIAS constante entre diferentes previsões pode ser utilizado para realizar uma “correção” nos dados previstos, somando-o com cada elemento da sequência.

3.6.4 Média

Como o objetivo do trabalho é melhorar a previsão de geração eólica em um determinado período, foi considerado apropriado avaliar a diferença da média observada com a prevista, já que o seu valor pode ser uma boa representação da potência total gerada no período.

$$Média = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (3.4)$$

4 Resultados

4.1 Cenários

Com o intuito de verificar a influência dos parâmetros do modelo, diversos cenários foram simulados. Note que cada cenário representa uma configuração diferente do WRF e do WPS.

4.1.1 Execução padrão

Para iniciar o desenvolvimento, foi executado o WRF com a parametrização padrão do modelo. Esta simulação foi utilizada como referência para a comparação das melhorias de cada cenário.

A execução padrão consiste no seguinte cenário:

Parâmetro	Valor
Cenário	1
Condições de contorno	GFS 0.5°
Resolução do maior domínio	15km
Número de domínios	2
Suite Física	CONUS

Tabela 4 – Cenário 1

Após executar o modelo, pode-se então comparar o resultado da simulação do Cenário 1 com os dados reais observados:

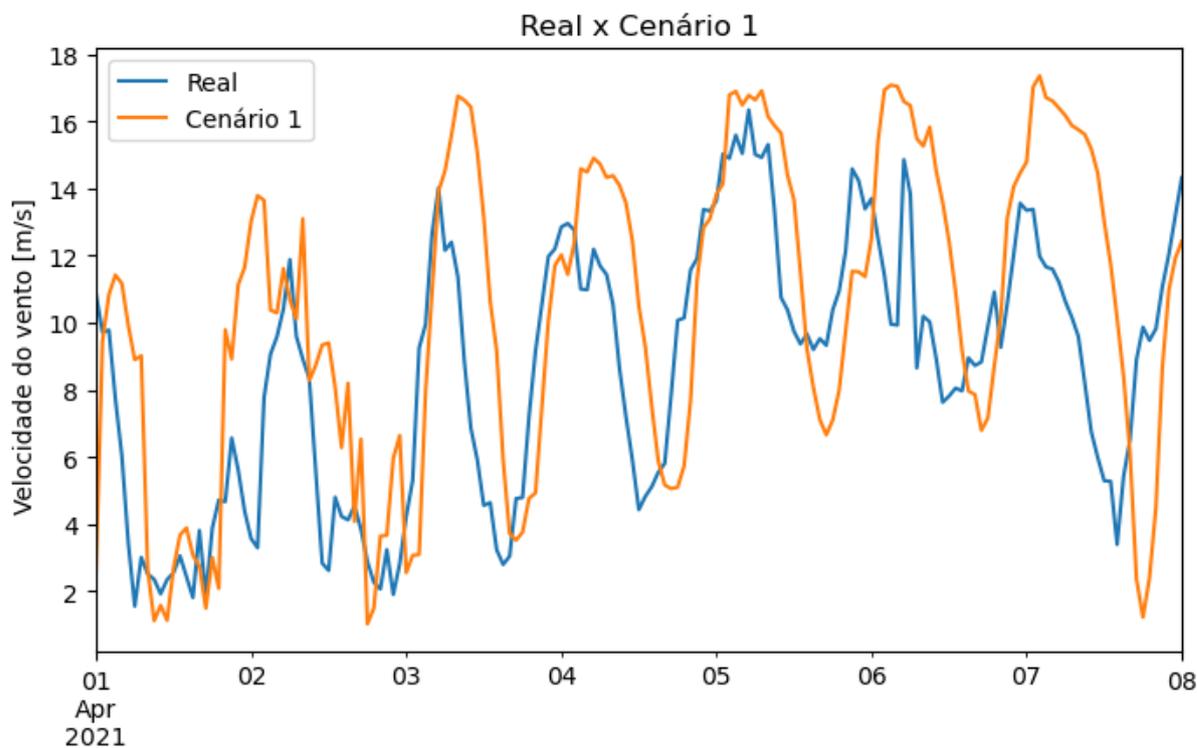


Figura 5 – Cenário 1

Métrica	Valor
RMSE	4,19
BIAS	4,99
MAPE	55%
Média (ref.:8,58)	10,30
Tempo de execução	2h41min

Tabela 5 – Métricas Cenário 1

Como foram definidos dois domínios a serem simulados no WRF, a saída do modelo é dividida em dois resultados, um para cada domínio. O resultado apresentado representa apenas os dados do segundo domínio da simulação, ou seja, com resolução de 5km. O primeiro domínio é sempre descartado, pois não possui uma periodicidade constante entre as simulações, além de não atingir resultados favoráveis.

Pode-se observar que a simulação conseguiu acompanhar as tendências da velocidade do vento, apesar da superestimação.

O resultado representa a configuração padrão do modelo WRF, sem nenhuma modificação nos parâmetros além da região selecionada (domínio). Por isso, ainda há bastante espaço para melhorias.

4.1.2 Resolução do GFS

A segunda etapa do desenvolvimento constituiu em avaliar se a resolução dos dados de entrada (GFS) possui algum impacto no resultado da simulação. Assim, o WRF foi executado com a mesma parametrização que o Cenário 1, porém com o GFS 0.25° como condição de contorno:

Parâmetro	Valor
Cenário	2
Condições de contorno	GFS 0.25°
Resolução do maior domínio	15km
Número de domínios	2
Suite Física	CONUS

Tabela 6 – Cenário 2

Obteve-se os seguintes resultados:

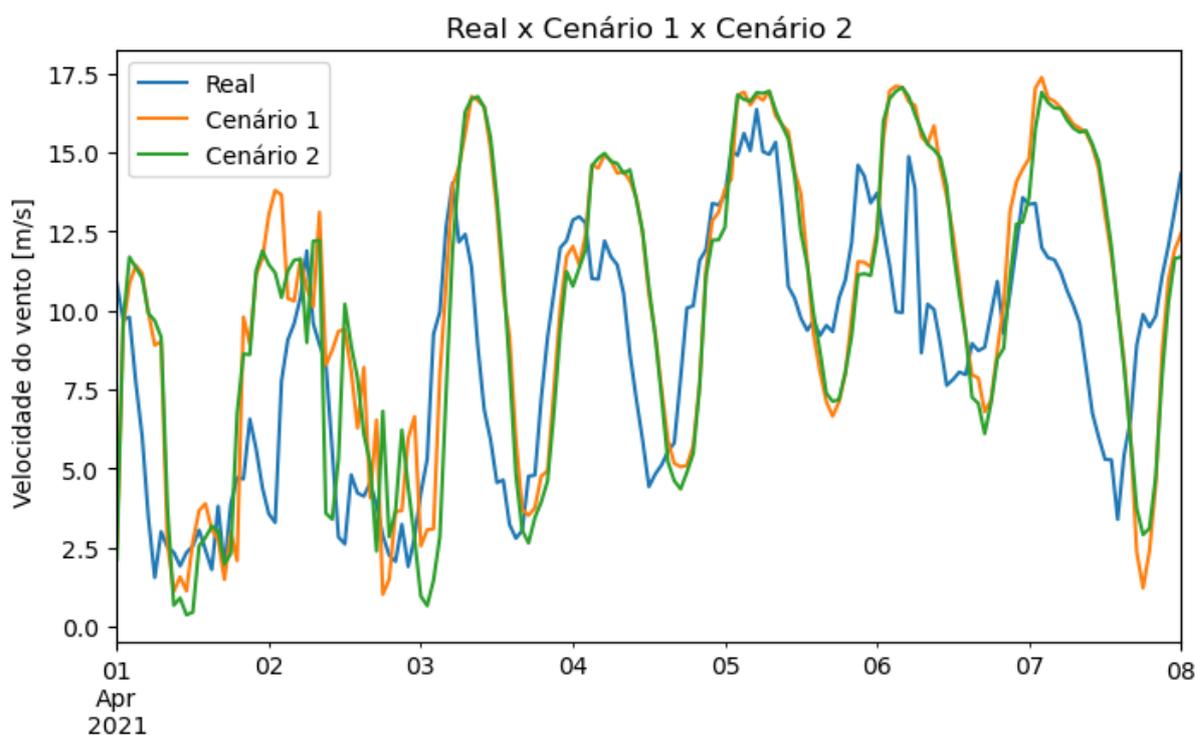


Figura 6 – Cenário 2

Métrica	Valor
RMSE	4,21
BIAS	5,00
MAPE	56%
Média (ref.:8,58)	9,97
Tempo de execução	1h46min

Tabela 7 – Métricas Cenário 2

Pode-se observar que ambas as simulações obtiveram resultados muito semelhantes. Se avaliarmos as métricas estatísticas, pode-se concluir que as diferenças entre os dois resultados estão dentro da margem de erro. Foi concluído então que a resolução das condições de contorno não possui um impacto significativo na previsão.

Porém, ao observar o tempo de execução de ambos os cenários, repara-se que o Cenário 2 demorou aproximadamente 1h a menos, por isso, para os cenários futuros, será utilizado apenas o GFS 0.25°, visando diminuir o tempo gasto executando o modelo.

4.1.3 Resolução dos domínios

O próximo parâmetro a ser avaliado é a resolução dos domínios de simulação. Foi avaliado se um aumento da resolução espacial da simulação resultada em uma melhor representação da região onde foi coletado os dados. Para isso, foi avaliado as resoluções de 15k e 9km para o primeiro domínio. Note que, resoluções maiores do que 9km não foram utilizadas devido à instabilidade do modelo perante a resoluções tão grandes.

Parâmetro	Valor
Cenário	3
Condições de contorno	GFS 0.25°
Resolução do maior domínio	9km
Número de domínios	2
Suite Física	CONUS

Tabela 8 – Cenário 3

A resolução de 9km foi configurada alterando o valor dos parâmetros dx e dy nos respectivos arquivos de configuração `namelist.input` e `namelist.wps`. Com isso, foi comparado o resultado com os dados reais e com o último cenário (Cenário 2):

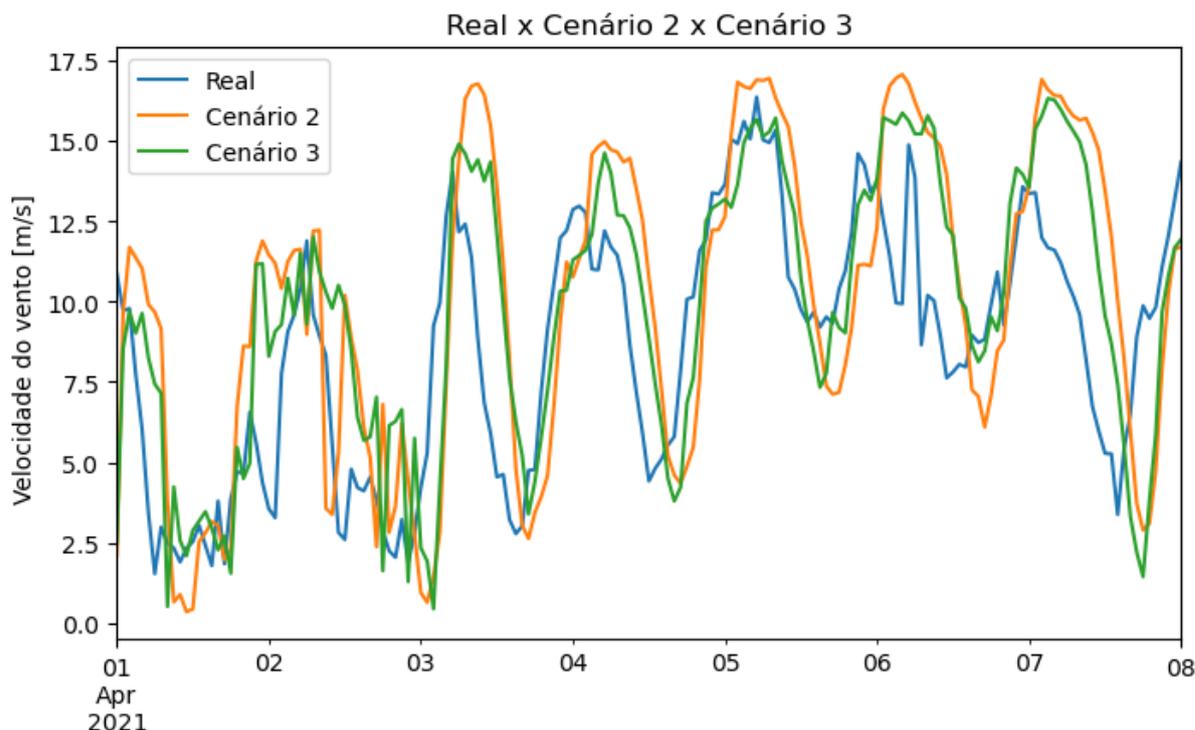


Figura 7 – Cenário 3

Métrica	Valor
RMSE	3,42
BIAS	4,40
MAPE	46%
Média (ref.:8,58)	9,74
Tempo de execução	2h40min

Tabela 9 – Métricas Cenário 3

Observa-se que o aumento da resolução do domínio teve um impacto significativo na previsão da velocidade do vento. O RMSE teve uma redução de 4,21 para 3,42 e o BIAS reduziu de 5,00 para 4,40. A média também se aproximou ainda mais da observada de 8,52. Em contrapartida, como a resolução do aumentou significativamente, o tempo de execução aumentou para 2h e 40min.

4.1.4 Número de domínios

Outra forma de obter maiores resoluções sem ter que aumentar a resolução do primeiro domínio, é aumentar o número de domínios de simulação. Nesta etapa do trabalho, o número de domínios foram aumentados de 2 para 3 e 4 domínios. Um grande fator limitante desta etapa foi o tempo de execução. Nas simulações com 2 domínios, as execuções levam em torno de 2h e 40min e 1h e 46min, já com 4 domínios, algumas simulações excederam 16h. Por isso, foi limitado o número de domínios para no máximo 4.

Como foi obtido resultados melhores com a resolução de 9km no Cenário 3, foi utilizada apenas essa resolução, já que o tempo gasto com as simulações é significativamente longo.

Parâmetro	Valor
Cenário	4
Condições de contorno	GFS 0.25°
Resolução do maior domínio	9km
Número de domínios	3
Suite Física	CONUS

Tabela 10 – Cenário 4

Parâmetro	Valor
Cenário	5
Condições de contorno	GFS 0.25°
Resolução do maior domínio	9km
Número de domínios	4
Suite Física	CONUS

Tabela 11 – Cenário 5

Como descrito anteriormente, foi escolhida uma razão de 3:1 entre os domínios e o primeiro domínio é sempre descartado. Por isso, o cenário 3 possui 2 domínios que podem ser comparados (3km e 1km). Já o cenário 4 possui 3 (3km, 1km e 0,333km).

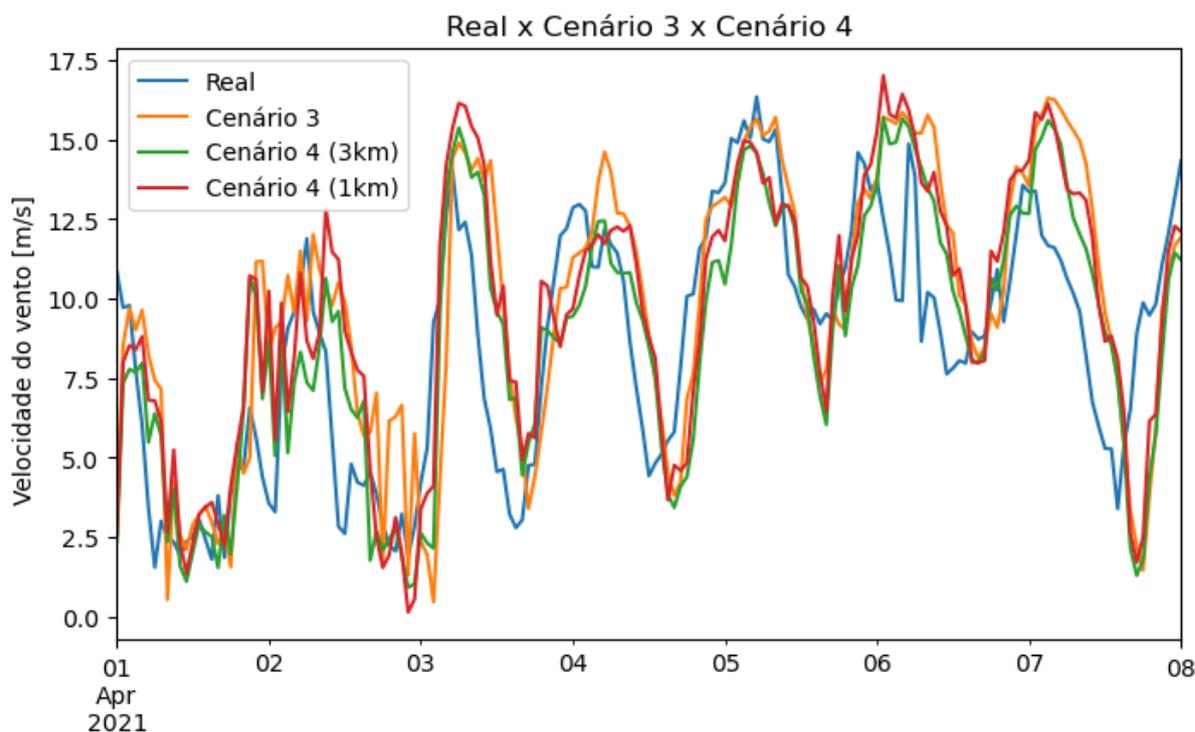


Figura 8 – Cenário 4

Métrica	Domínio 2 (3km)	Domínio 3 (1km)
RMSE	2,95	3,14
BIAS	0,265	4,25
MAPE	37%	41%
Média (ref.:8,58)	8,85	9,59
Tempo de execução	8h09min	

Tabela 12 – Métricas Cenário 4

Neste cenário pode-se observar um comportamento peculiar: os resultados de maiores resoluções possuem resultados piores do que as menores resoluções da mesma execução. Após pesquisar, foi descoberto que o WRF possui uma configuração padrão de propagação ativada, ou seja, os resultados dos domínios “filhos” são utilizados para melhorar o resultado de seu domínio parente. Por isso, os cenários de 3 e 4 domínios possuem resultados melhores no segundo domínio.

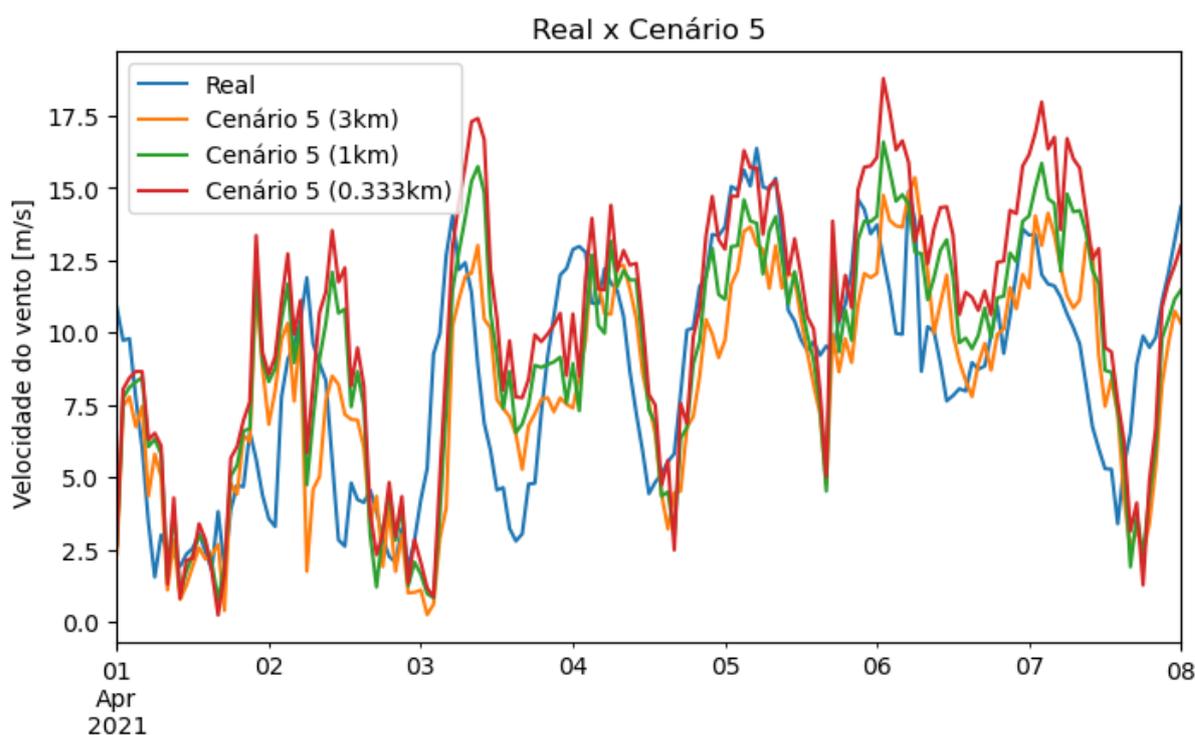


Figura 9 – Cenário 5

Métrica	Domínio 2 (3km)	Domínio 3 (1km)	Domínio 4 (0.333km)
RMSE	3,10	3,29	3,77
BIAS	0,382	0,599	1,612
MAPE	37%	42%	48%
Média (ref.:8,58)	8,20	9,18	10,19
Tempo de execução	16h18min		

Tabela 13 – Métricas Cenário 5

O cenário 5 teve o mesmo comportamento que o cenário anterior, o conjunto de dados do domínio de menor resolução (3km) possui o melhor resultado, também é possível observar que a sua curva possui a menor superestimação do conjunto.

Comparado com o cenário 4, o aumento de três para quatro domínios não obteve nenhuma melhoria nas métricas estatísticas. O que leva a indicar que o número ideal de domínios para esta aplicação específica seja três.

Além disso, o tempo de simulação do cenário com quatro domínios praticamente dobrou, como é mostrado na tabela 13. No entanto, como mencionado anteriormente, o modelo WRF é altamente escalável com o número de processadores lógicos, por isso, a diferença de tempo de execução pode ser mitigada com a utilização de computadores em cluster.

4.1.5 Suites físicas

A última parametrização avaliada foi as suites de representações físicas. Foram avaliadas as duas mencionadas anteriormente, a CONUS e a tropical. Como os cenários anteriores já utilizava a suite CONUS (configuração padrão do WRF), foi necessário apenas executar o modelo com a configuração tropical.

Parâmetro	Valor
Cenário	6
Condições de contorno	GFS 0.25°
Resolução do maior domínio	9km
Número de domínios	3
Suite Física	Tropical

Tabela 14 – Cenário 6

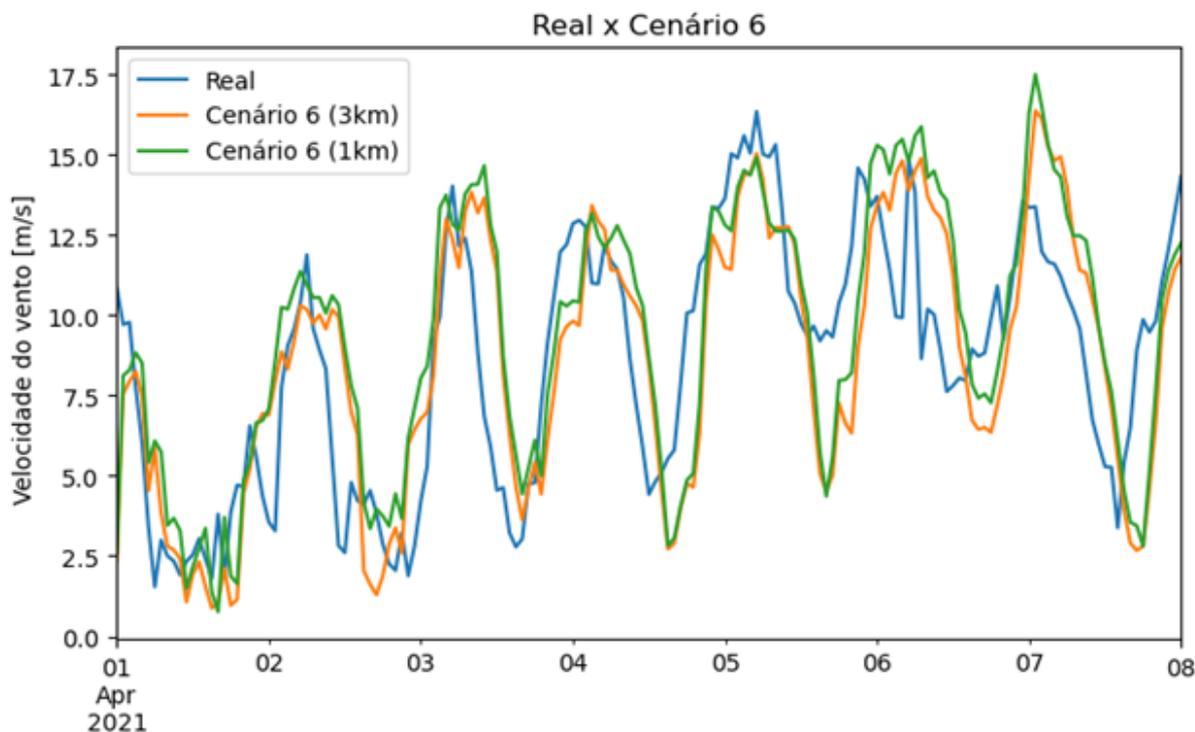


Figura 10 – Cenário 6

Métrica	Domínio 2 (3km)	Domínio 3 (1km)
RMSE	3,00	3,07
BIAS	0,013	0,772
MAPE	38%	41%
Média (ref.:8,58)	8,60	9,35
Tempo de execução	6h38min	

Tabela 15 – Métricas Cenário 6

Além de ter alcançado ótimas métricas, o cenário 6 obteve uma média muito próxima da observada, com uma diferença de apenas $0,2 \text{ m/s}$, um ótimo indicador de excelência em previsão de geração.

O tempo de execução também foi reduzido, de 8h e 9min para 6h e 38min comparado ao cenário 4.

Parâmetro	Valor
Cenário	6
Condições de contorno	GFS 0.25°
Resolução do maior domínio	9km
Número de domínios	4
Suite Física	Tropical

Tabela 16 – Cenário 7

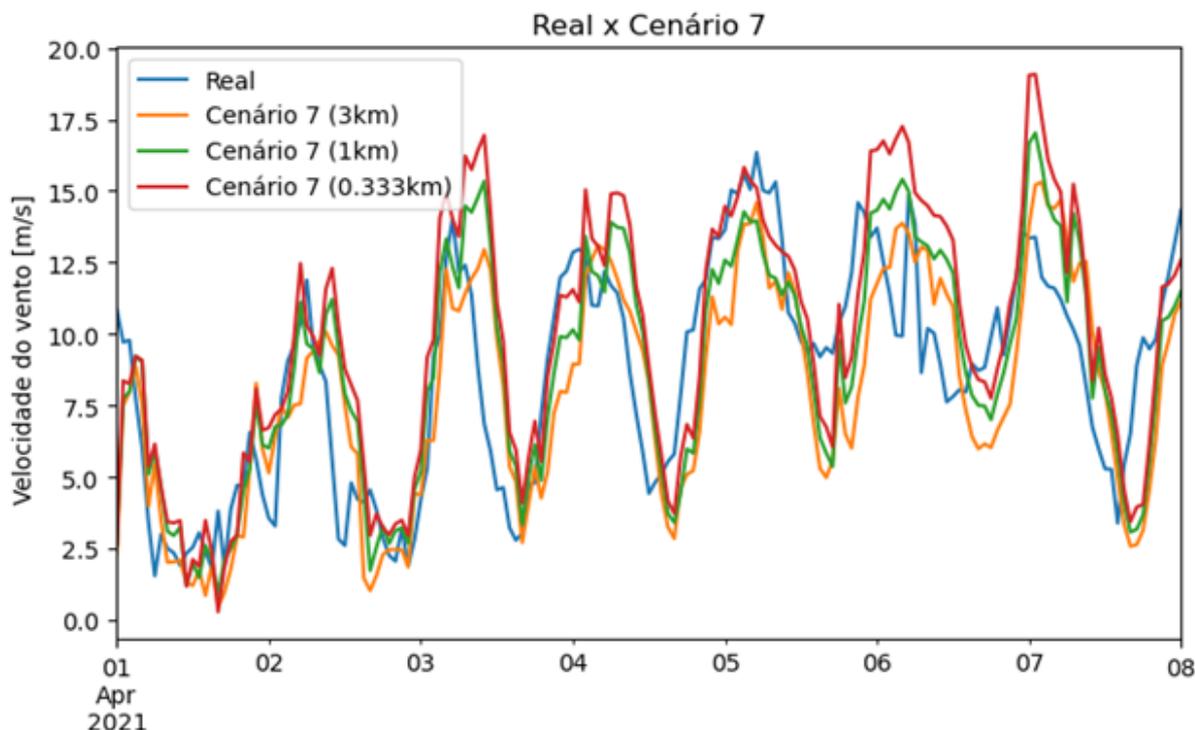


Figura 11 – Cenário 7

Métrica	Domínio 2 (3km)	Domínio 3 (1km)	Domínio 4 (0.333km)
RMSE	2,95	2,85	3,21
BIAS	0,580	0,316	1,277
MAPE	35%	35%	39%
Média (ref.:8,58)	8,00	8,90	9,86
Tempo de execução		14h38min	

Tabela 17 – Métricas Cenário 7

Apesar do cenário 7 ter obtido um RMSE e MAPE inferiores ao cenário anterior, a diferença é muito pequena para justificar a discrepância da média e BIAS, além do tempo de execução praticamente dobrado. Por isso, concluiu-se novamente que o número ideal de domínios de simulações seja de apenas três.

4.2 Comparação com previsão original (GFS)

Para confirmar a hipótese de que o modelo WRF consegue melhorar a previsão original da região, foram comparados os gráficos e as métricas do melhor cenário (Cenário 6) com os dados brutos do modelo GFS utilizado na execução.

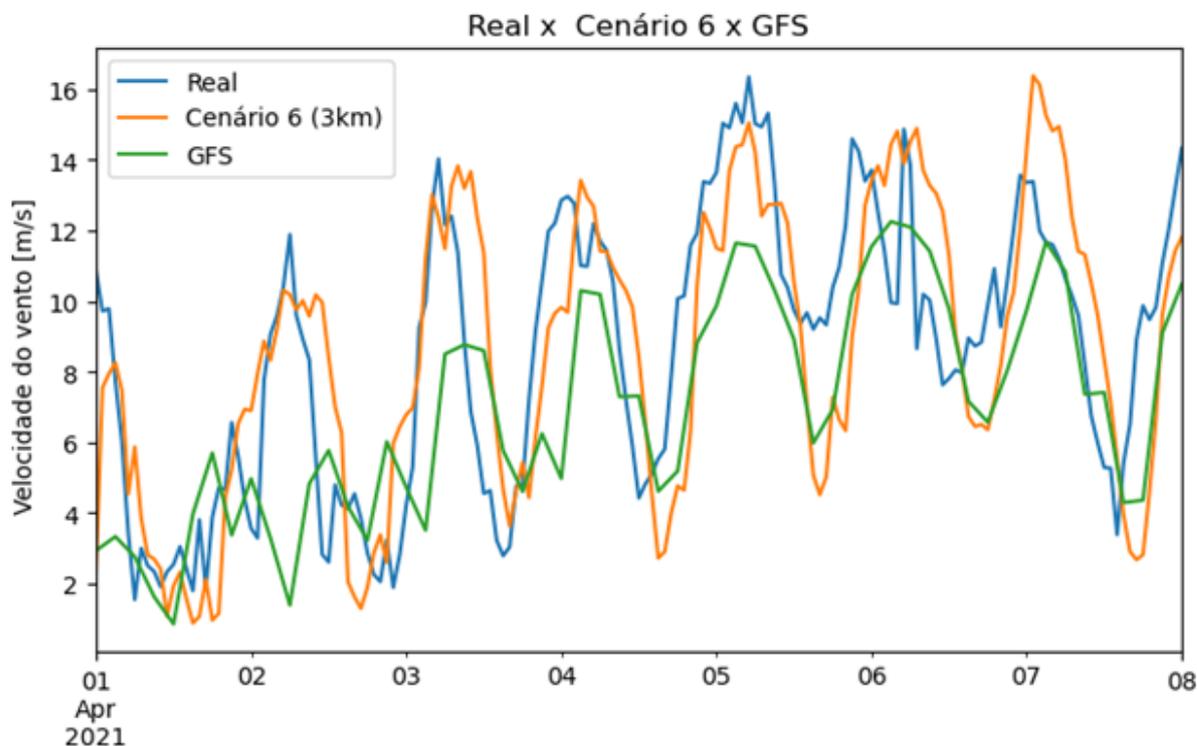


Figura 12 – Comparação GFS

Métrica	Cenário 6 (3km)	GFS
RMSE	3,00	3,31
BIAS	0,013	1,615
MAPE	38%	36%
Média (ref.:8,58)	8,60	6,97
Tempo de execução	8h09min	

Tabela 18 – Métricas Cenário 6 e GFS

Pode-se concluir que o Cenário 6 obteve uma melhoria significativa em comparação ao GFS, confirmando a teoria. A principal melhoria pode ser observada na diferença da média - que terá grande impacto na conversão para potência total disponível. O Cenário 6 obteve uma diferença de apenas 0,02 m/s enquanto o GFS difere de 1,61 m/s.

4.3 Potência total disponível

A partir das séries horárias do período e da fórmula 2.7, é possível calcular as diferenças de potência total disponível no período em cada uma das previsões. Como não está sendo avaliada uma turbina eólica específica e a fórmula depende da área total de varredura, pode-se generalizar a comparação transformando a potência em potência por unidade de área com a fórmula 2.8.

Apenas o segundo domínio (o com os melhores resultados) foi utilizado para os cenários 4, 5 e 6.

$$\frac{\text{Potência total [kW/m}^2\text{]}}{104,81}$$

Tabela 19 – Potência total observada por unidade de área

Cenário	1	2	3	4 (3km)	5 (3km)	6 (3km)	7 (3km)	GFS
P. Total	179,97	170,91	147,21	90,94	115,02	108,70	115,91	54,16
Dif. (%)	72%	63%	40%	-13%	10%	4%	11%	-48%

Tabela 20 – Diferenças de potencias totais

Novamente, o cenário 6 obteve o melhor resultado, com uma diferença da potência total de apenas 4%. Note que o modelo WFR tem uma tendência contrária ao GFS. Isto é, ao invés de subestimar, o modelo WFR tende a superestimar.

4.3.1 Validação do resultado

Com a intuição de reduzir a possibilidade de coincidência e validar os resultados do cenário 6, foi executado mais uma simulação do cenário em um período diferente. Mais precisamente na primeira semana de agosto de 2021, conforme a tabela 21.

Início	01/08/2021 00:00
Fim	08/08/2021 00:00

Tabela 21 – Período de validação

O modelo foi configurado com exatamente os mesmos parâmetros e foi obtido o seguinte resultado:

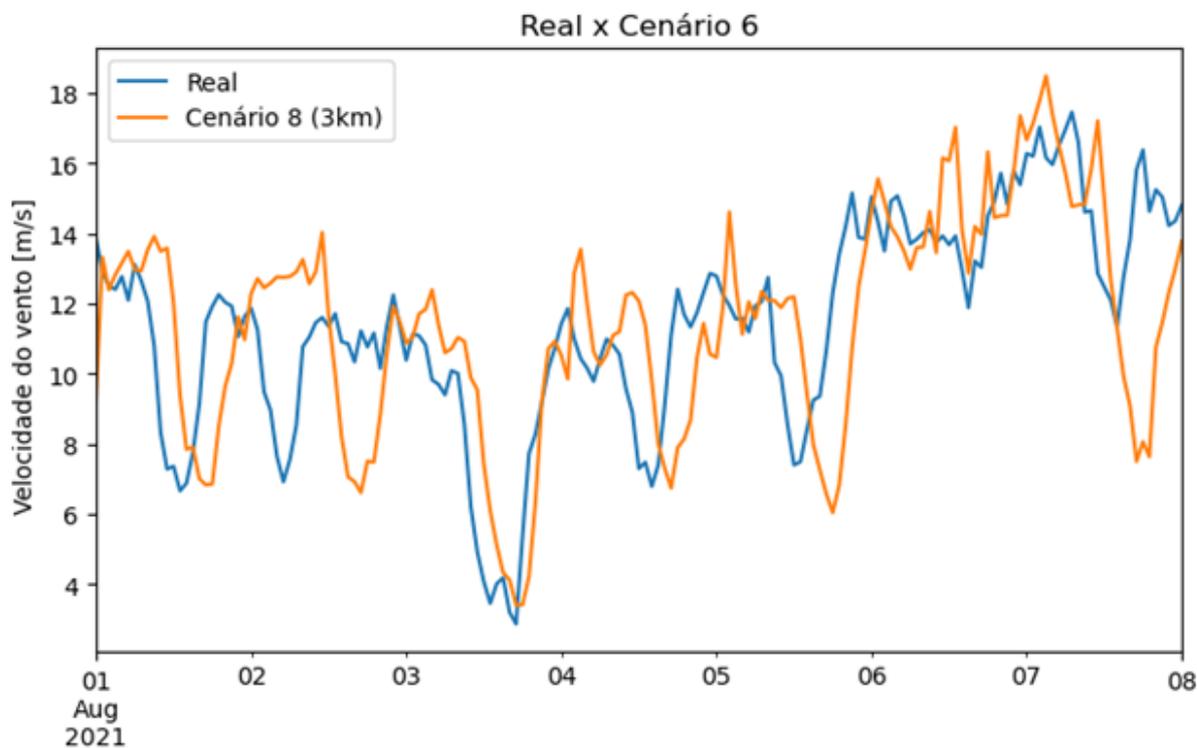


Figura 13 – Cenário 6 em agosto

Métrica	Cenário 6 (abril)	Cenário 6 (agosto)
RMSE	3,00	2,74
BIAS	0,013	0,006
MAPE	38%	21%
Dif. Média	0,02	0,01
Dif. P	4%	2%

Tabela 22 – Métricas Cenário 6 em abril e agosto

No mês de agosto, o cenário 6 conseguiu resultados ainda melhores do que comparado ao mês de abril. Ele obteve uma diferença de apenas 0,01 m/s na média e 2% na potência total disponível. Com estes resultados conclui-se que o sexto cenário possui a melhor representação da área de estudo.

5 Conclusões

Foi utilizado o modelo WRF para realizar previsões da velocidade do vento em 6 cenários diferentes. Os cenários foram selecionados com base no estudo do manual de usuário do próprio WRF, assim como outros artigos relacionados.

Cenário	1	2	3	4 (3km)	5 (3km)	6 (3km)	7 (3km)	GFS
RMSE	4,19	4,21	3,42	2,95	3,10	3,00	2,95	3,31
BIAS	1,719	1,383	1,154	0,265	0,382	0,013	0,580	1,615
MAPE	55%	56%	46%	37%	37%	38%	35%	36%
Média (ref.: 8,58)	10,30	9,97	9,74	8,85	8,20	8,60	8,00	6,97
Tempo de execução	2h41	1h46	2h40	8h09	16h18	6h38	14h38	-
Dif. P(%)	72%	63%	40%	-13%	10%	4%	11%	-48%

Tabela 23 – Todas as métricas dos cenários

Com base na tabela 23, conclui-se que:

- A resolução dos dados de entrada não tem influência significativa no resultado. Porém é possível reduzir o tempo de execução com a resolução de 0.25°.
- Previsões com resolução espacial de 9km no primeiro domínio obtiveram resultados melhores do que as de 15km.
- Para os cenários avaliados, o número ideal de domínios foi três.
- A parametrização do cenário 6 obteve os melhores resultados.
- Com o melhor cenário, obteve-se resultados muito favoráveis em relação a previsão original do GFS.
- O cenário 6 obteve uma potência total disponível muito próxima da observada, com uma diferença de apenas 4% para o período de estudo.

Com isso, pode-se concluir que o modelo WRF mostrou-se ser uma ferramenta eficaz na previsão de geração eólica. Vale ressaltar que devido à natureza caótica do vento e da limitação computacional dos computadores modernos, nenhum modelo de previsão consegue realizar previsões da velocidade do vento com 100% de acurácia.

As melhorias obtidas na parametrização do modelo serão somente válidas para a região e aplicação deste estudo específico. Por isso, é reforçado a importância da identificação de um conjunto apropriado para cada aplicação.

Como foi observado, o aumento do número de domínio e da resolução teve grande impacto no tempo de execução da simulação, chegando até 16 horas; 13 horas a mais do

que a configuração padrão do WRF. Por isso, dependendo da aplicação, deve ser avaliado se a melhoria na acurácia compensa o aumento da demanda computacional. Também é possível utilizar diretamente os dados oriundos do GFS para previsões de geração, dispensando as simulações do modelo numérico.

Também concluiu-se que os resultados das simulações do WRF têm fortes tendências de superestimar o resultado em comparação aos observados, em contrapartida o GFS tende a subestimar.

6 Pesquisas futuras

Como a máquina utilizada para executar as simulações não é necessariamente apropriada para a aplicação, o estudo foi severamente limitado computacionalmente. Por isso, o estudo de parametrização das configurações de física foi limitado às suites pré-configuradas do modelo. Para futuros estudos, recomenda-se analisar as condições atmosféricas e climáticas da região para configurar as opções de física individualmente. Para isso, deverá ser feito um estudo de caso específico para a região a ser simulada.

Com exceção do cenário 6, os resultados das parametrizações foram avaliados apenas para a primeira semana de abril. Por isso, sugere-se simular em mais períodos para fortalecer a validação do resultado, preferivelmente ao longo de um ano para captar todas as estações.

Referências Bibliográficas

- 1 ABEEÓLICA. Boletim anual de geração eólica 2021. 2021. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/07/ABEEOLICA_BOLETIMANUAL-2021_PORT.pdf>. 14
- 2 FILGUEIRAS, A.; SILVA, T. Wind energy in brazil - present and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 7, p. 439–451, 10 2003. 14
- 3 SENADO. *CI aprova marco legal para exploração da energia gerada em alto-mar*. 2022. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2022/08/17/ci-aprova-marco-legal-para-exploracao-da-energia-gerada-em-alto-mar>>. Acesso em: 20 novembro 2022. 14
- 4 ROOMI, T. O. Vertical coordinate systems. *Numerical W. Prediction*, 2021. Disponível em: <https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/6/6_2021_06_22!09_48_43_AM.pdf>. 16
- 5 PIELKE, R. A.; HAYDEN, B. P. *Planetary boundary layer*. 2016. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/planetary-boundary-layer>>. Acesso em: 20 novembro 2022. 18
- 6 MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. *Wind energy explained: Theory, design and Application*. [S.l.]: Wiley, 2011. 18, 19
- 7 NASA. *Derive Wind Speed and Direction With MERRA-2 Wind Components*. 2019. Disponível em: <<https://disc.gsfc.nasa.gov/information/data-in-action>>. Acesso em: 10 novembro 2022. 19
- 8 VARGAS, S. A. *Previsão Da Distribuição Da Densidade De Probabilidade Da Geração De Energia Eólica Usando Técnicas Não Paramétricas*. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.26821>>. Acesso em: 5 novembro 2022. 19
- 9 NOAA. *Global Forecast System (GFS)*. 2022. Disponível em: <<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>>. Acesso em: 8 novembro 2022. 20
- 10 UCAR. *Weather Research amp; Forecasting Model (WRF)*. 2021. Disponível em: <<https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>>. Acesso em: 2 novembro 2022. 20
- 11 UCAR. *Namelist.input: Best practices*. 2022. Disponível em: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/namelist_best_prac_wrf.html>. Acesso em: 20 outubro 2022. 21
- 12 UCAR. *Namelist.wps: Best practices*. 2022. Disponível em: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/namelist_best_prac_wps.html>. Acesso em: 20 outubro 2022. 21
- 13 BHIMIREDDY, S. R.; BHAGANAGAR, K. Short-term passive tracer plume dispersion in convective boundary layer using a high-resolution wrf-arw model. *Atmospheric Pollution Research*, v. 9, 09 2018. 21

- 14 NCAR. *wrf-python*. 2022. Disponível em: <<https://wrf-python.readthedocs.io/en/latest/>>. Acesso em: 25 outubro 2022. 22
- 15 NOAA. *Global Forecast System (GFS)*. 2022. Disponível em: <<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>>. Acesso em: 5 outubro 2022. 23
- 16 UCAR. *WRF Physics Suites*. 2022. Disponível em: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/wrf_physics_suites.php>. Acesso em: 4 novembro 2022. 23
- 17 PERMADI, D. A. et al. Wrf performance analysis and scalability on multicore high performance computing systems. In: _____. *TORUS 1 – Toward an Open Resource Using Services*. John Wiley Sons, Ltd, 2020. cap. 18, p. 275–289. ISBN 9781119720492. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119720492.ch18>>. 24
- 18 CEPEL. *Modelo DESSEM - MANUAL DO USUÁRIO*. [s.n.], 2019. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=5364eca8-5f33-ba3b-fe16-c48f305179d2&groupId=36070>. 24
- 19 HYNDMAN, R. J.; KOEHLER, A. B. Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, v. 22, n. 4, p. 679–688, 2006. ISSN 0169-2070. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169207006000239>>. Acesso em: 6 novembro 2022. 25
- 20 ORACLE. *MAPE (Erro Percentual Absoluto Médio)*. 2022. Disponível em: <https://docs.oracle.com/cloud/help/pt_BR/pbcs_common/PFUSU/insights_metrics_MAPE.htm>. Acesso em: 6 novembro 2022. 25
- 21 PAL, R. Chapter 4 - validation methodologies. In: PAL, R. (Ed.). *Predictive Modeling of Drug Sensitivity*. Academic Press, 2017. p. 83–107. ISBN 978-0-12-805274-7. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012805274700004X>>. 25