



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Parametrizações de Rajadas de Ventos Baseadas Em Equações para o Espectro de Energia Cinética Turbulenta no Sul do Brasil

Lucas da Costa Berna¹; Jonas da Costa Carvalho^{2*}; Rose Ane Pereira de Freitas³, Marcelo Felix Alonso⁴

¹ Mestre em Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Departamento de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Capão do Leão, RS, Brasil, lucas.berna@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-3418-8764>). ² Doutor em Meteorologia, Professor Titular, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Departamento de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Capão do Leão, RS, Brasil, jonas.carvalho@ufpel.edu.br (<https://orcid.org/0000-0001-9825-2991>); *Autor correspondente. ³ Doutora em Meteorologia, Professora Permanente, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Departamento de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Capão do Leão, RS, Brasil, freitas.rose@ufpel.edu.br (<https://orcid.org/0000-0003-0186-3484>). ⁴ Doutor em Meteorologia, Professor Associado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Departamento de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Capão do Leão, RS, Brasil, marcelo.alonso@ufpel.edu.br (<https://orcid.org/0000-0001-6611-3911>).

Artigo recebido em 01/08/2025 e aceito em 21/04/2026

ABSTRACT

Accurate wind gust estimation is essential for reducing risks in sectors such as transportation, agriculture, energy, and civil defense. However, numerical weather prediction models do not directly provide this variable, requiring the use of specific parameterizations. This study aimed to estimate wind gusts based on Turbulent Kinetic Energy (TKE) fields in the Atmospheric Boundary Layer (ABL). Three parameterizations from the literature, derived from dimensional turbulence spectra, were applied, along with a newly proposed method that represents the turbulent term as the standard deviation of a sinusoidal function. The estimates were compared with hourly wind data from INMET surface weather stations (EMS) located in six municipalities of Rio Grande do Sul, southern Brazil: Bagé, Bento Gonçalves, Canela, Mostardas, Porto Alegre, and Santa Maria. The results indicated that all methods were able to reproduce the general patterns of gust intensification and weakening. The new method demonstrated stable performance and a lower tendency to overestimate peak values. Mostardas stood out negatively due to the presence of deep convection, which is not well captured by TKE-based approaches. Statistical indices (RMSE, BIAS, and MAPE) confirmed higher accuracy in moderate-intensity gust estimation, particularly in mountainous regions. These findings support the viability of using TKE as a physical basis for wind gust estimation and highlight the potential of the proposed method in complex atmospheric environments.

Keywords: atmospheric turbulence, sinusoidal function, atmospheric stability, numerical modeling, observational validation.

Wind Gust Parameterizations Based on Equations for the Turbulent Kinetic Energy Spectrum in Southern Brazil

RESUMO

Estimativas precisas de rajadas de vento são fundamentais para reduzir riscos em setores como transporte, agricultura, energia e defesa civil. No entanto, os modelos numéricos de previsão do tempo não fornecem essa variável de forma direta, sendo necessário o uso de parametrizações específicas. Este estudo teve como objetivo estimar rajadas de vento com base no campo de Energia Cinética Turbulenta (ECT) na Camada Limite Atmosférica (CLA). Foram aplicadas três parametrizações descritas na literatura, baseadas em espectros dimensionais de turbulência, além da proposição de um novo método, que representa o termo turbulento como o desvio padrão de uma função senoidal. As estimativas foram comparadas com dados horários de vento provenientes de Estações Meteorológicas de Superfície (EMS) do INMET, localizadas em seis municípios do Rio Grande do Sul: Bagé, Bento Gonçalves, Canela, Mostardas, Porto Alegre e Santa Maria. Os resultados indicaram que todas as metodologias foram capazes de reproduzir os padrões gerais de intensificação e enfraquecimento das rajadas. O novo método apresentou desempenho estável e menor tendência à superestimação. A cidade de Mostardas destacou-se negativamente devido à presença de convecção profunda, não captada pelas parametrizações baseadas exclusivamente na ECT. Os índices estatísticos (RMSE, BIAS e MAPE) confirmaram maior acurácia nas estimativas de rajadas de intensidade moderada, especialmente em regiões serranas. Os resultados reforçaram a viabilidade do uso da ECT como base física para estimativas de rajadas e indicaram o potencial do novo método proposto em ambientes atmosféricos complexos.

Palavras-chave: turbulência atmosférica, função senoidal, estabilidade atmosférica, modelagem numérica, validação observacional.

Introdução

Métodos mais precisos de estimativa de rajadas de vento são essenciais para mitigar prejuízos sociais e econômicos significativos, como danos à aviação e à navegação, incidentes em rodovias, queda de árvores e de redes de transmissão de energia, colapsos estruturais, além de perdas nas atividades agrícola e pecuária. Esses métodos também contribuem para a identificação de locais com potencial para a geração de energia eólica (Born et al., 2012; Kurbatova et al., 2018; Lu et al., 2022; Guerrero-Navarro, 2025).

As rajadas de vento são caracterizadas por variações abruptas na velocidade e na direção do vento em curtos intervalos de tempo, geralmente inferiores a 20 segundos. Essas flutuações podem facilmente ultrapassar o dobro da velocidade média do vento durante eventos meteorológicos extremos (Jahan et al., 2025; Jones et al., 2022; Yan et al., 2022; Zhou et al., 2024).

Modelos numéricos de previsão do tempo simulam o campo de vento em intervalos temporais relativamente longos, o que torna necessária a aplicação de parametrizações para estimar rajadas de vento, que ocorrem em escalas muito mais curtas (Sheridan, 2011; Castorrini et al., 2023). Em geral, os ventos simulados próximos à superfície apresentam intensidades inferiores às rajadas observadas, devido ao fato de que as variáveis do modelo são formuladas como médias espaciais e temporais (associadas à caixa de grade e ao passo de tempo da simulação). Essa limitação é particularmente evidente durante episódios de vento forte, quando a variabilidade temporal das rajadas é elevada (Born et al., 2012; Rafei et al., 2023).

Além da literatura clássica, estudos recentes utilizando modelagem numérica de alta resolução têm explorado a representação das características do vento e sua dependência de parametrizações físicas (Gonçalves et al., 2024) e métodos de pós-processamento do WRF para melhorar a previsão de rajadas observadas (Mohammadi et al., 2024). Abordagens data-driven e técnicas híbridas também vêm sendo investigadas como caminhos complementares à modelagem física tradicional (Durran et al., 2020; Rasp et al., 2020; de Burgh-Day & Leeuwenburg, 2023).

Recentemente, avanços nas técnicas de previsão de vento e de rajadas têm incorporado abordagens integradas que conciliam a modelagem física dos processos atmosféricos com métodos

orientados por dados, visando aprimorar a representação da variabilidade em diferentes escalas. Os estudos demonstram que estratégias baseadas em aprendizado de máquina e pós-processamento estatístico das saídas de modelos numéricos podem reduzir vieses sistemáticos, quantificar incertezas e melhorar a previsão de rajadas associadas a eventos extremos (Jahan et al., 2025). Nesse contexto mais amplo, a integração entre conhecimento físico e técnicas de aprendizado profundo tem sido apontada como um caminho promissor para o avanço da previsão atmosférica e da ciência do sistema terrestre, especialmente em sistemas complexos e não lineares (Reichstein et al., 2019; Rasp et al., 2020; Weyn et al., 2020).

A acurácia das previsões de vento é sensível a diversos aspectos dos modelos numéricos, incluindo as condições de inicialização, a resolução espacial e temporal e, especialmente, as parametrizações físicas aplicadas, como as da Camada Limite Atmosférica (CLA) e da interface superfície-atmosfera (Cao & Fovell, 2016, Piotrowski et al., 2022).

A variabilidade e a intermitência das rajadas de vento tornam sua representação um desafio na modelagem atmosférica, especialmente em escalas de meso e microescala. Estudos recentes demonstram que a inclusão da Energia Cinética Turbulenta (ECT) como variável auxiliar permite refinar a simulação das perturbações de alta frequência associadas às rajadas, sobretudo quando combinada com parametrizações baseadas em propriedades espectrais da turbulência (Mangia, Degrazia e Rizza, 2000; Weyn et al., 2020; Gonçalves et al., 2024). Nesse contexto, o uso da ECT como base para a estimativa de rajadas representa uma abordagem promissora para aprimorar previsões operacionais e estudos de risco.

Além disso, frente ao crescimento da energia eólica no Brasil, especialmente na Região Sul, a identificação precisa da intensidade e da frequência de rajadas extremas é essencial para o planejamento da expansão energética e para a mitigação de riscos estruturais. Modelos que incorporam o espectro da energia cinética turbulenta, ajustados a diferentes condições de estabilidade da CLA, oferecem uma base teórica sólida para o desenvolvimento de métodos de estimativa mais robustos e fisicamente fundamentados (Champagne et al., 1977; Sorbjan,

1989). Essa abordagem fortalece a conexão entre observações de superfície, teoria da turbulência atmosférica e aplicação prática.

O objetivo deste estudo é analisar o desempenho de parametrizações baseadas na Energia Cinética Turbulenta na representação das rajadas de vento na CLA no sul do Brasil, considerando diferentes condições atmosféricas e topográficas, bem como avaliar o potencial de uma nova abordagem conceitual para a descrição do termo turbulento associado às rajadas.

Material e métodos

Esta seção descreve os procedimentos adotados para a realização do estudo, abrangendo desde a caracterização das áreas de análise e a coleta de dados observacionais até a configuração do modelo numérico e a formulação das estimativas de rajadas de vento. Os métodos aplicados incluem o uso de dados de superfície provenientes de estações meteorológicas automáticas, simulações com o modelo WRF (Weather Research and Forecasting) e a aplicação de parametrizações baseadas no espectro de energia cinética turbulenta. A seguir, são apresentados os detalhes sobre a área de estudo, os conjuntos de dados utilizados e os critérios adotados para o cálculo das estimativas.

Área de estudo

O presente estudo foi conduzido em seis localidades do estado do Rio Grande do Sul, região Sul do Brasil: Bagé, Bento Gonçalves, Canela, Mostardas, Porto Alegre e Santa Maria (Figura 1). Essas localidades foram selecionadas com base em suas diferentes características topográficas, altitudes e influências meteorológicas regionais, permitindo uma avaliação abrangente do desempenho das parametrizações de rajadas de vento sob variadas condições de superfície e dinâmica atmosférica.

As cidades analisadas abrangem desde regiões serranas, como Bento Gonçalves e Canela, até

planícies costeiras, como Mostardas, e centros urbanos, como Porto Alegre e Santa Maria. Essa diversidade favorece a análise da influência da rugosidade do terreno e das trocas turbulentas nas camadas mais baixas da atmosfera (Degrazia et al., 2000; Sorbjan, 1989).

A região Sul do Brasil é caracterizada por forte variabilidade climática, com influências frequentes de sistemas frontais, ciclones extratropicais e eventos de convecção profunda (Reboita et al., 2024; Trassante et al., 2024). Essas condições favorecem a ocorrência de ventos intensos e rajadas, constituindo um ambiente propício à validação de modelos de previsão e parametrizações baseadas em ECT.

Variável Analisada

A variável meteorológica analisada neste estudo é a rajada de vento (em km/h), definida como o valor máximo instantâneo da velocidade do vento registrado em um intervalo de tempo específico, tipicamente de três segundos, conforme os padrões da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2023). Diferentemente da velocidade média do vento, as rajadas representam flutuações súbitas e intensas, podendo superar significativamente os valores médios em curtos períodos.

Rajadas com velocidades superiores a 60 km/h são frequentemente associadas a riscos à integridade de estruturas, queda de árvores e interrupções no fornecimento de energia (Born et al., 2012; Sheridan, 2011). Assim, a estimativa precisa dessa variável é essencial para a previsão de riscos meteorológicos e para o aprimoramento de estratégias de mitigação.

Neste trabalho, as rajadas de vento são estimadas com base em parametrizações que utilizam o campo de ECT, permitindo avaliar o desempenho de diferentes métodos sob variadas condições topográficas e atmosféricas.

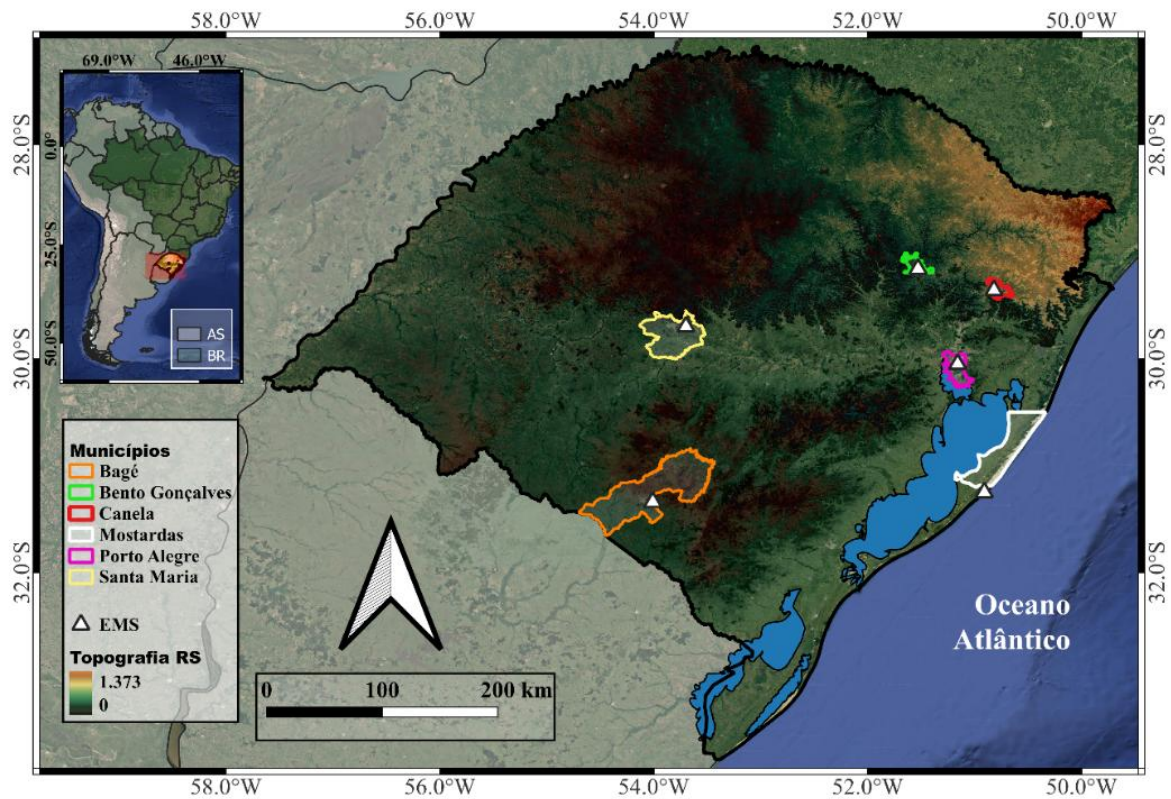


Figura 1. Localização dos municípios do estado do Rio Grande do Sul onde estão instaladas as EMS da rede do INMET utilizadas neste estudo. Os triângulos brancos indicam a posição geográfica das EMS nas seis localidades analisadas: Santa Maria, Porto Alegre, Mostardas, Canela, Bagé e Bento Gonçalves. As áreas coloridas delimitadas no mapa representam os limites municipais de cada cidade estudada. No canto superior esquerdo, o mapa de inserção mostra a localização do estado do Rio Grande do Sul no contexto do território brasileiro e sul-americano.

Dados de Superfície

Foram utilizadas EMS automáticas da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que operam com sensores automáticos e fornecem medições horárias de velocidade do vento, direção

e rajadas. Os dados foram coletados em períodos específicos entre janeiro e novembro de 2018, conforme detalhado na Tabela 1. As estações estão distribuídas em diferentes contextos geográficos e de altitude, conforme apresentado a seguir:

Tabela 1 - Localização, tipo e altitude das estações meteorológicas de superfície automáticas do INMET utilizadas no estudo. Apresentam-se os códigos identificadores, as coordenadas geográficas (latitude e longitude em graus decimais) e a altitude (em metros) das estações, distribuídas em diferentes municípios do estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

Estação	Código	Tipo	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período de Simulação
Bagé	A827	Automática	-31,34	-54,01	230	09/05/2018 a 19/05/2018
Bento Gonçalves	A840	Automática	-29,16	-51,53	640	05/07/2018 a 15/07/2018
Canela	A879	Automática	-29,36	-50,82	830	08/11/2018 a 18/11/2018
Mostardas	A878	Automática	-31,25	-50,91	10	20/09/2018 a 30/09/2018
Porto Alegre	A801	Automática	-30,05	-51,16	47	28/05/2018 a 07/06/2018
Santa Maria	A803	Automática	-29,70	-53,70	95	06/01/2018 a 16/01/2018

Configuração do modelo WRF

Como sugerido por Born et al. (2012), para aplicações em modelos numéricos do tempo, variáveis resolvidas pelo próprio modelo, podem ser usadas para estimar rajadas. Nesse sentido, a utilização de um modelo permitiria a previsão de eventos de rajadas de vento em qualquer localização do domínio de simulação. Optou-se por obter os parâmetros de similaridade, necessários para compor as expressões do espectro de ECT a partir de simulações com o modelo WRF.

Neste estudo, o modelo foi configurado com três grades aninhadas, conforme detalhado na Tabela 2. As parametrizações físicas utilizadas nas simulações com o WRF incluem parametrização da CLA, parametrização de superfície,

parametrização de cumulus, parametrização de microfísica de nuvens e parametrização de radiação, também especificadas nas Tabelas 2 e 3. A representação dos processos de superfície e das trocas de energia e umidade entre o solo e a atmosfera baseia-se no acoplamento solo-hidrologia originalmente proposto por Chen e Dudhia (2001). O período de simulação e as coordenadas dos pontos de grade das cidades estudadas são especificados na Tabela 1. Das saídas do modelo são obtidas as variáveis de velocidade do vento em 10 m (\bar{V}), velocidade de fricção (u_*), altura da CLA (h, z_i), fluxo de calor sensível cinemático e comprimento de Obukov (L).

Tabela 2 - Características dos domínios de simulação

Parâmetro	Grade Externa	Grade Intermediária	Grade Interna
Grade horizontal	100 pontos	100 pontos	100 pontos
Espaçamento de grade	9 km	3 km	1 km

Tabela 3 – Configurações gerais utilizadas na simulação com o modelo WRF

Configuração	Descrição
Condições iniciais e de contorno	GFS (0,25°)
Níveis na vertical	32 camadas
Período de spin-up	10 dias
Parametrização de CLA	Yonsei University (YSU)
Parametrização de superfície	Monin-Obukhov Similarity Theory (MM5 MRF PBL)
Parametrização de cúmulos	Betts-Miller-Janjic
Parametrização de microfísica de nuvens	WSM 3-class scheme (Hong et al., 2004)
Parametrização de radiação	RRTM

Cálculo do espectro de ECT

Após a obtenção das variáveis, a ECT é calculada utilizando as expressões para o espectro de velocidade em todas as condições de estabilidade, de acordo com Mangia et al. (2000) e Degrazia et al. (2000). A dispersão turbulenta na CLA é gerada por dois processos diferentes: mecânico e térmico (Mangia et al., 2000). O primeiro está relacionado ao cisalhamento do vento e é mais eficaz próximo ao solo. O segundo resulta de um mecanismo de força de empuxo e é geralmente responsável pelo transporte convectivo de momento, calor ou outros escalares. Essas duas forças produzem uma ampla gama de vórtices turbulentos e, conseqüentemente, uma distribuição espectral de ECT em uma ampla faixa de escalas (Degrazia et al., 2000).

O comprimento de Obukhov (L) é utilizado como parâmetro de estabilidade para

classificar a camada limite como estável/neutro ou instável/neutro. Se $L > 0$, somente as parametrizações de cisalhamento atuam (caso noturno), ou seja, na equação (1), o termo $S_{ib}^E(n) = 0$. Se $L < 0$, ocorre a concorrência entre empuxo e cisalhamento, com o somatório das duas componentes (caso diurno) e, nesse caso, os dois termos, $S_{ib}^E(n)$ e $S_{is}^E(n)$, são considerados.

Assim, assumindo a hipótese de superposição dos efeitos produzidos pelos forçantes mecânica e térmico, pode-se escrever os espectros eulerianos dimensionais como:

$$S_i^E(n) = S_{ib}^E(n) + S_{is}^E(n) \tag{1}$$

onde o primeiro termo no lado esquerdo da equação representa a produção por empuxo e o segundo termo representa a componente mecânica, sendo que o subscrito b representa o empuxo (*Buoyancy*), s representa o cisalhamento (*Shear*) e

$i = u, v, w$. De acordo com Degrazia et al. (1998), os espectros dimensionais de turbulência convectiva na CLA podem ser escritos como:

$$\frac{nS_{ib}^E(n)}{w_*^2} = \frac{1,06c_i f \left(\psi_\varepsilon \frac{z}{z_i}\right)^{2/3}}{[(f_m^*)_i^c]^{5/3} \left\{1 + \frac{1,5f}{[(f_m^*)_i^c]}\right\}^{5/3}} \quad (2)$$

onde w_* é a escala de velocidade convectiva, $f = \frac{nz}{U}$ é a frequência reduzida, U é a velocidade média do vento, z é a altura acima da superfície, $(f_m^*)_i^c$ é a frequência reduzida do pico do espectro convectivo, $\psi_\varepsilon = \frac{\varepsilon_b z_i}{w_*^3}$ é a função taxa de dissipação adimensional, ε_b é o taxa de dissipação de ECT devido ao empuxo e z_i é altura da CLA.

A componente mecânica do espectro dimensional é igual ao limite neutro descrito em Degrazia e Moraes (1992):

$$\frac{nS_{is}^E(n)}{u_*^2} = \frac{1,5c_i f \phi_\varepsilon^{2/3}}{[(f_m^*)_i^{n+s}]^{5/3} \left\{1 + \frac{1,5f^{5/3}}{[(f_m^*)_i^{n+s}]^{5/3}}\right\}} \quad (3)$$

onde u_* é a velocidade de fricção, $\phi_\varepsilon = \frac{\varepsilon_s \kappa z}{u_*^3}$ é a função taxa de dissipação adimensional, ε_s é a taxa de dissipação de ECT devido à turbulência mecânica, κ é a constante de von Karman e $(f_m^*)_i^{n+s}$ é a frequência reduzida do pico espectral neutro ou estável. Para as equações 2 e 3, $c_i = \alpha_i \alpha_u (2\pi \kappa)^{-2/3}$, $\alpha_u = 0,5 \pm 0,05$ e $\alpha_i = 1, \frac{4}{3}, \frac{4}{3}$ para u, v, w , respectivamente (Champagne et al., 1977; Sorbjan, 1989).

Integrando, analiticamente, os espectros Eulerianos dados pelas equações 2 e 3, em todo o domínio de frequências, obtém-se a variância da velocidade do vento para turbulência térmica

$$\sigma_{ib}^2 = \int_0^\infty S_{ib}^E(n) dn = \frac{1,06c_i \psi_\varepsilon^{2/3} w_*^2 \left(\frac{z}{z_i}\right)^{2/3}}{[(f_m^*)_i^c]^{2/3}} \quad (4)$$

e mecânica

$$\sigma_{is}^2 = \int_0^\infty S_{is}^E(n) dn = \frac{2,32c_i \phi_\varepsilon^{2/3} u_*^2}{[(f_m^*)_i^{n+s}]^{2/3}} \quad (5)$$

Ao somar as duas componentes, determina-se a variância total da velocidade do vento:

$$\sigma_i^2 = a_i^2 w_*^2 + b_i^2 u_*^2 \quad (6)$$

onde a_i e b_i são os termos da força de empuxo e da tensão de cisalhamento, respectivamente. Em todas as derivações foi assumido que as variâncias Lagrangiana e Euleriana do campo turbulento do vento são iguais, uma vez que a ECT é a mesma para ambas as abordagens (Wilson, 1996).

Parametrização da Rajada de Vento

Neste trabalho, três métodos de estimativa de rajada disponíveis na literatura são avaliados, e uma parametrização é sugerida. Os valores das variâncias de velocidade [equações (4) e (5)] são aplicados para determinar a ECT e para estimar as rajadas de vento.

Supondo que a distribuição da velocidade do vento seja normal, Kurbatova et al. (2018) obtiveram a seguinte parametrização:

$$ERV = \underline{V} + 3\sigma = \underline{V} + 3\sqrt{ECT} \quad (7)$$

onde ERV é a estimativa da rajada de vento, \underline{V} é a velocidade média do vento, σ é o desvio padrão da velocidade do vento e ECT representa a Energia Cinética Turbulenta.

Assumindo que a ECT representa o desvio máximo da média instantânea do vento, Born et al., (2012) apresentou a seguinte estimativa:

$$ERV = \underline{V} + \sqrt{2ECT} \quad (8)$$

Com base nos parâmetros de ajustes dos dados de observação definidos pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), onde $t = 3$ s é a duração da rajada de vento e $z = 10$ m é a altura de observação, Schreur e Geertsema (2008) desenvolveram a seguinte parametrização:

$$ERV = \underline{V} \left(1 + g r_\sigma \frac{\sqrt{2ECT}}{\underline{V}}\right) \quad (9)$$

onde

$$g = 1,42 + 0,3013 \ln\left(\frac{990}{\underline{V}t} - 4\right) \quad (10)$$

e

$$r_{\sigma} = \left(1 - 0.069 \exp \left(-2.3 \frac{Vt}{z} \right) \right) \times \exp \left(-2.3 \left(\frac{Vt}{z} \right)^{0.555} \right) \quad (11)$$

A nova parametrização para a ERV baseia-se, primeiramente, na suposição apresentada por Suomi (2018), na qual a velocidade da rajada de vento é tipicamente dividida em termos de uma velocidade média do vento e um termo de flutuação, que é proporcional ao desvio padrão da velocidade do vento. Além disso, de acordo com Belusic & Mahrt (2012), uma forma senoidal, para escalas menores, geralmente aparece acoplada a um ambiente caótico apenas como um único comprimento de onda, que pode estar relacionada a vórtices turbulentos e a instabilidade gerada pelo cisalhamento do vento. Sugere-se, portanto, um método de ERV, representando o termo turbulento como uma função senoidal da seguinte forma:

$$ERV = \underline{V} + \sqrt{\underline{V} \cdot \cos \left(\frac{ECT}{\underline{V}} \right)} \quad (12)$$

Índices Estatísticos de Avaliação de Desempenho

Foram utilizados três índices estatísticos para avaliar o desempenho das estimativas de rajadas de vento: o RMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio), o BIAS (viés médio) e o MAPE (Erro Percentual Absoluto Médio), conforme descrito por Gneiting & Katzfuss (2014):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (13)$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (14)$$

$$MAPE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \right) \times 100 \quad (15)$$

onde “P” representa o valor previsto (simulado), “O” representa o valor observado e “n” indica o número de dados.

O RMSE quantifica a magnitude média dos erros entre os valores estimados e observados, sendo desejável que seus valores sejam próximos

de zero. O BIAS indica a tendência sistemática das estimativas, evidenciando se há superestimação ou subestimação em relação aos dados observados, de forma que quanto mais próximos de zero melhor será a previsão. Já o MAPE expressa o erro médio em termos percentuais, sendo amplamente utilizado por sua interpretação intuitiva: valores inferiores a 10% indicam alta precisão; entre 10% e 20%, boa precisão; entre 20% e 50%, precisão razoável; e acima de 50%, baixa precisão.

Resultados e discussão

Caracterização Sinótica dos Eventos Meteorológicos

A análise dos resultados deste estudo foi organizada em duas etapas principais: inicialmente, realizou-se a caracterização sinótica dos principais sistemas meteorológicos que atuaram nas regiões de estudo; em seguida, procedeu-se à avaliação estatística do desempenho das parametrizações de rajadas de vento implementadas. A inclusão da análise sinótica teve como objetivo contextualizar as condições atmosféricas responsáveis pela geração das rajadas observadas nas EMS do INMET. A identificação dos sistemas sinóticos atuantes no período permitiu compreender a dinâmica dos eventos de vento intenso e forneceu subsídios para a interpretação do desempenho das diferentes metodologias de estimativa.

A caracterização dos eventos meteorológicos que influenciaram a ocorrência de rajadas de vento nas cidades analisadas foi realizada com base nas saídas do modelo WRF, conforme descrito na seção de Material e Métodos. As Figuras 2 apresentam os campos de pressão ao nível médio do mar, temperatura do ar a 2 metros e vento a 10 metros de altura, obtidos a partir das simulações numéricas para os períodos de interesse em cada localidade.

Essas variáveis foram selecionadas por permitirem uma análise integrada dos principais sistemas sinóticos e de sua influência sobre os padrões de vento observados. Durante o período de 9 a 19 de maio de 2018, a cidade de Bagé foi afetada por dois episódios de frentes frias (nos dias 11 e 15 de maio), intercalados por condições de instabilidade associadas a sistemas convectivos (Figura 2a). Esses sistemas foram determinantes para os dois picos de rajadas registrados nas EMS, com velocidades superiores a 60 km/h.

Na cidade de Bento Gonçalves, entre 5 e 15 de julho de 2018, observou-se a atuação inicial de um sistema de baixa pressão, seguido pela

passagem de uma frente fria no terceiro dia do período simulado (Figura 2b). Esse sistema frontal foi responsável pelo pico de 55 km/h observado nas

rajadas de vento. Posteriormente, uma massa de ar frio e seco estabeleceu condições estáveis na região, reduzindo a intensidade das rajadas.

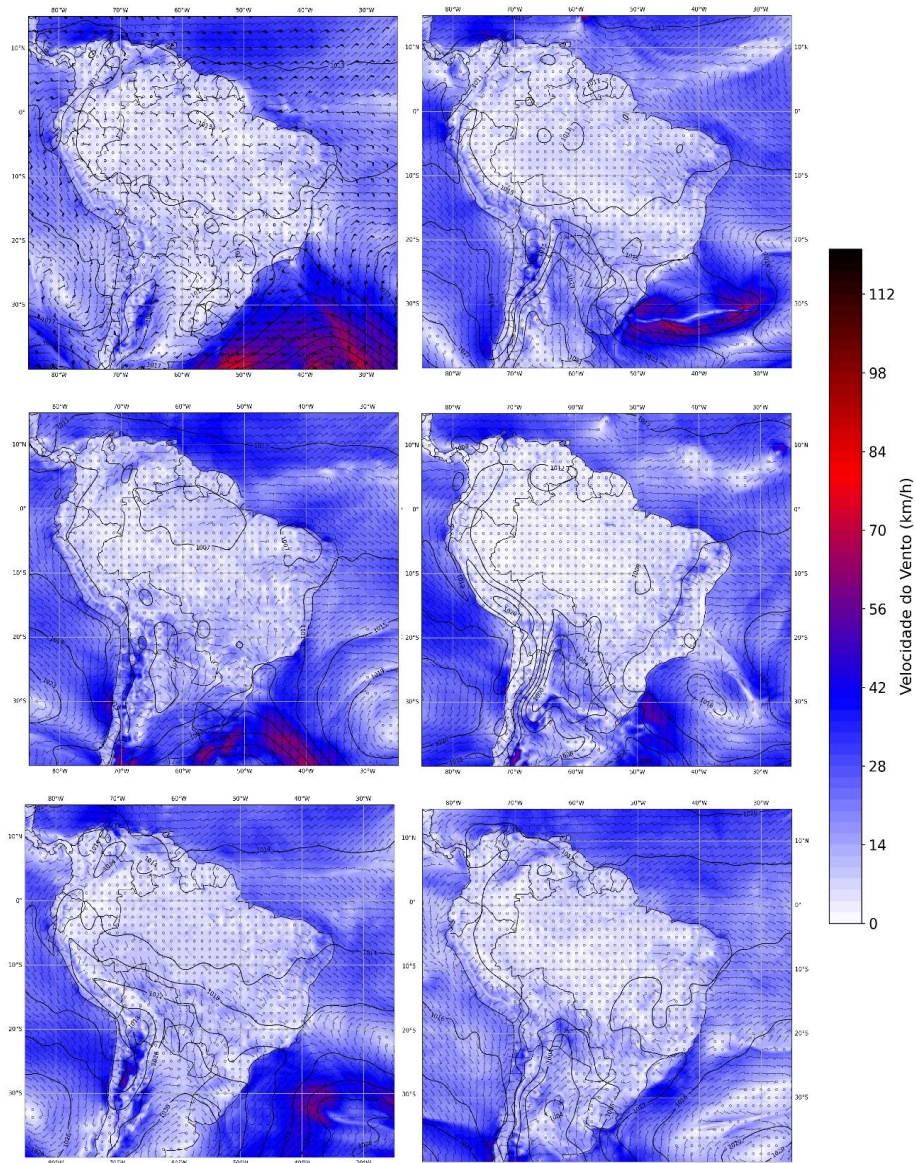


Figura 2. Campos sinóticos gerados a partir das simulações do modelo WRF, apresentando a distribuição de pressão ao nível médio do mar (linhas de contorno em preto, hPa), velocidade do vento (sombas de cor, km/h) e vetores de vento a 10 metros de altura (setas), para os diferentes períodos de análise em cada localidade do Rio Grande do Sul. As subfiguras correspondem às seguintes regiões e datas: (a) Bagé, no período de 09 a 19 de maio de 2018; (b) Bento Gonçalves, de 05 a 15 de julho de 2018; (c) Canela, de 08 a 18 de novembro de 2018; (d) Mostardas, de 20 a 30 de setembro de 2018; (e) Porto Alegre, de 28 de maio a 06 de junho de 2018; e (f) Santa Maria, de 06 a 16 de janeiro de 2018. Esses campos sinóticos caracterizam os principais sistemas atmosféricos atuantes durante os eventos de rajadas de vento analisados, incluindo a passagem de frentes frias, a atuação de sistemas convectivos e o estabelecimento de massas de ar de diferentes características.

Para Canela, entre 8 e 18 de novembro de 2018, o cenário sinótico inicial foi dominado por um sistema de alta pressão posicionado sobre o Atlântico, que manteve o tempo seco nos primeiros

dias (Figura 2c). No decorrer do período, a entrada de sistemas convectivos e a passagem de uma frente fria favoreceram a intensificação das rajadas, com registros superiores a 60 km/h.

Durante o intervalo de 20 a 30 de setembro de 2018, a cidade de Mostardas foi influenciada por uma sequência de sistemas convectivos organizados, com destaque para um Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) que se formou sobre o estuário do Rio da Prata (Figura 2d). Esse evento foi responsável pela ocorrência de uma frente de rajada que atingiu velocidades superiores a 100 km/h, evidenciando a importância da convecção profunda na geração de extremos de vento.

Na cidade de Porto Alegre, entre 28 de maio e 6 de junho de 2018, o período foi predominantemente estável devido à atuação de um sistema de alta pressão (Figura 2e). Apenas durante a passagem de uma frente fria, no dia 31 de maio, foram observadas rajadas mais intensas, com valores entre 15 e 30 km/h.

Por fim, em Santa Maria, no período de 6 a 16 de janeiro de 2018, uma frente fria inicial foi sucedida por um bloqueio atmosférico que manteve o tempo estável durante vários dias (Figura 2f). Apesar disso, ocorreram oscilações rápidas na velocidade do vento, com variações diárias que atingiram picos de até 45 km/h.

A análise sinótica permitiu estabelecer a relação entre os diferentes sistemas meteorológicos que atuaram durante os períodos de estudo e os padrões de rajadas de vento registrados nas EMS. Os resultados reforçaram a influência direta de frentes frias, sistemas convectivos e áreas de baixa pressão na intensificação das rajadas, especialmente nas regiões serranas e litorâneas do Rio Grande do Sul. Estudos anteriores já haviam destacado o papel desses sistemas na modulação da intensidade dos ventos em superfície, com ênfase no aumento dos gradientes de pressão associados à passagem de frentes e ao desenvolvimento de instabilidades convectivas (Gatzen, 2023; Mathias et al., 2019).

Na seção seguinte, é apresentada a avaliação quantitativa das estimativas de rajadas de vento obtidas pelas diferentes parametrizações testadas, com base nos índices estatísticos RMSE, BIAS e MAPE. Essa abordagem possibilitou uma análise integrada entre o ambiente sinótico

identificado e o desempenho das parametrizações na reprodução dos padrões observados nas EMS.

Avaliação Estatística das Estimativas de Rajada

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos a partir da comparação entre as rajadas de vento estimadas pelas diferentes parametrizações e os dados observacionais registrados nas EMS do INMET. A análise abrangeu a representação temporal das rajadas nas seis localidades estudadas, com ênfase nos padrões de intensificação, enfraquecimento e nos picos máximos. Além disso, discutiram-se os desempenhos quantitativos de cada método com base em métricas estatísticas, permitindo avaliar a capacidade de cada parametrização em capturar adequadamente as variações do vento em diferentes contextos topográficos e meteorológicos. As figuras a seguir ilustram os resultados de forma detalhada, destacando as diferenças regionais e as limitações observadas em cenários de maior complexidade atmosférica.

A Figura 3 apresenta a evolução temporal das rajadas de vento estimadas e observadas nas EMS do INMET, durante o período simulado, para as cidades de (a) Bagé, (b) Bento Gonçalves, (c) Canela, (d) Mostardas, (e) Porto Alegre e (f) Santa Maria. De modo geral, as parametrizações reproduziram de forma satisfatória os estágios de amplificação e enfraquecimento da velocidade das rajadas de vento no período estudado para a cidade de Bagé, embora cada método tenha estimado os picos de rajada de maneira distinta (Figura 3a). O novo método representou satisfatoriamente o ciclo de intensificação e enfraquecimento das rajadas, mas apresentou tendência à subestimação dos picos. O método de Kurbatova estimou satisfatoriamente os valores de maior intensidade, embora tenha superestimado os valores menos intensos. O método de Born representou bem os valores mais elevados, mas também tendeu à superestimação dos picos menores. A parametrização de Scheuer, por sua vez, superestimou os picos de rajada ao longo do período simulado.

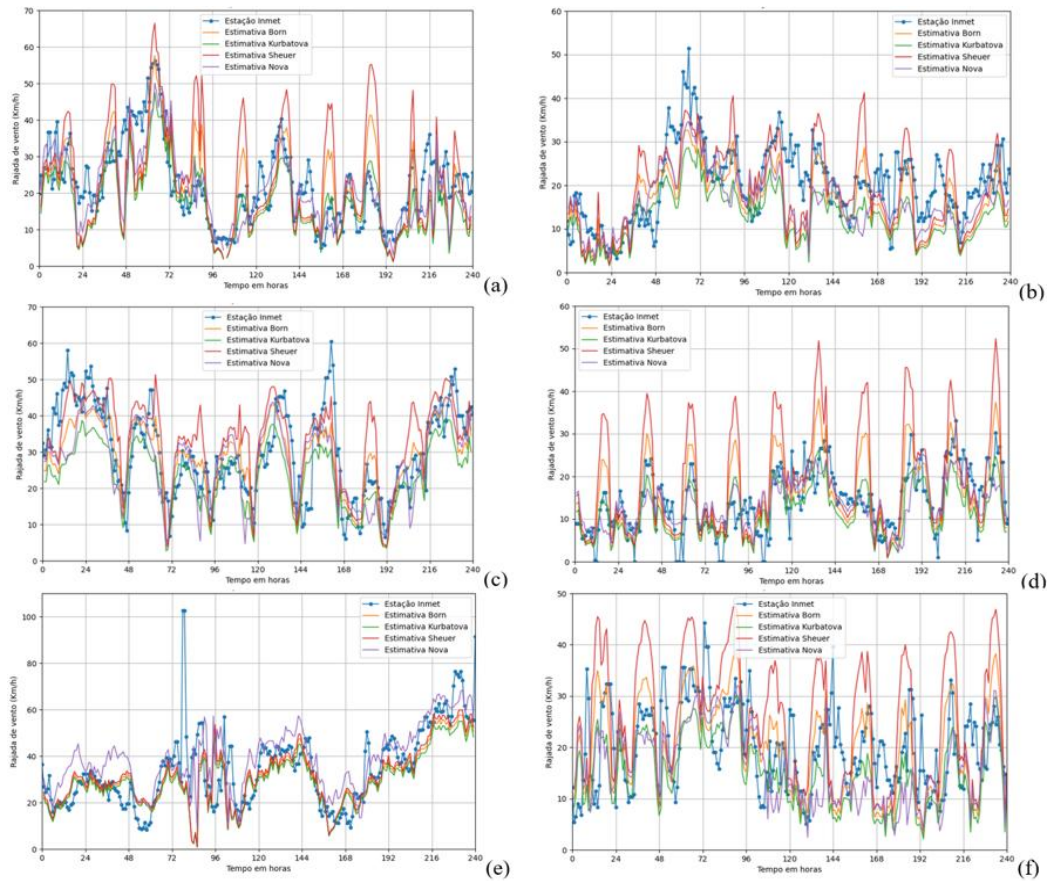


Figura 3. Comparação entre rajadas de vento observadas (EMS/INMET) e estimadas pelas parametrizações avaliadas para: (a) Bagé, (b) Bento Gonçalves, (c) Canela, (d) Mostardas, (e) Porto Alegre e (f) Santa Maria.

As rajadas de vento estimadas para a cidade de Bento Gonçalves são ilustradas na Figura 3b. As parametrizações representaram razoavelmente bem os momentos de intensificação e enfraquecimento das rajadas. A parametrização de Scheuer apresentou a melhor representação dos picos de rajada ocorridos entre as 48 e 72 horas de simulação, embora tenha superestimado diversos outros picos ao longo do restante do período. A estimativa de Born, apesar de superestimar alguns picos, representou de forma satisfatória a evolução temporal das rajadas. A nova estimativa e a de Kurbatova também apresentaram bom desempenho, sem superestimar os picos em nenhum momento da simulação.

A Figura 3c apresenta as rajadas de vento estimadas para a cidade de Canela durante o período analisado. As estimativas reproduziram bem os momentos de intensificação e enfraquecimento das rajadas ao longo dos dias. O novo método apresentou desempenho satisfatório, embora tenha superestimado levemente as rajadas em determinados momentos. A parametrização de Kurbatova também estimou adequadamente as rajadas, mas tendeu à subestimação em algumas

ocasiões. O método de Scheuer apresentou bons resultados, embora tenha superestimado as rajadas observadas em alguns instantes. O método de Born também apresentou desempenho positivo no período estudado, com leve superestimação das rajadas em alguns trechos da simulação.

As rajadas de vento estimadas para a cidade de Mostardas durante o período analisado são mostradas na Figura 3d. De modo geral, todos os métodos representaram bem os momentos de intensificação e enfraquecimento das rajadas observadas; no entanto, não reproduziram adequadamente o pico registrado entre 72 e 96 horas de simulação. Esse resultado já era esperado para métodos baseados exclusivamente em ECT, dada a limitação desses modelos em representar episódios de convecção profunda (Schreur e Geertsema, 2008; Born et al., 2012; Zulfikar et al., 2023). O novo método apresentou tendência à superestimação da velocidade das rajadas em alguns momentos, enquanto os demais métodos tenderam à subestimação na maior parte do período observado.

A Figura 3e ilustra a comparação entre as rajadas de vento observadas pela EMS do INMET

e aquelas estimadas para Porto Alegre. As parametrizações de Kurbatova e a nova proposta reproduziram satisfatoriamente as rajadas observadas, captando os períodos de intensificação e enfraquecimento. Por outro lado, os métodos de Born e de Scheuer superestimaram os picos de rajadas em diversas ocasiões, mostrando-se, portanto, menos adequados para o caso observado.

Durante o período analisado na cidade de Santa Maria, as rajadas de vento registradas pela EMS apresentaram grande amplitude ao longo dos dias (Figura 3f). Os métodos de estimativa apresentaram desempenhos variados na reprodução dos ciclos de intensificação e enfraquecimento da velocidade das rajadas. Os métodos de Born e de Scheuer tenderam à superestimação dos picos em diversos momentos, enquanto as parametrizações de Kurbatova e a nova proposta apresentaram tendência à subestimação dos picos.

A Figura 4 apresenta os resultados dos índices estatísticos RMSE, BIAS e MAPE obtidos a partir da comparação entre as parametrizações de rajadas de vento e os dados observacionais das EMS do INMET nas seis localidades analisadas. Em Bagé, o novo método proposto apresentou o melhor desempenho para o RMSE, com valores próximos de 8 km/h. As parametrizações de Born e de Kurbatova mostraram desempenhos semelhantes, com valores em torno de 10 km/h, enquanto a parametrização de Scheuer apresentou o maior erro, com aproximadamente 13 km/h. No que se refere ao BIAS, tanto o novo método quanto o de Kurbatova apresentaram tendência à subestimação dos valores observados, comportamento também verificado no método de Born. Por outro lado, a parametrização de Scheuer apresentou tendência à superestimação. Em relação ao MAPE, o novo método gerou o menor percentual de erro, com aproximadamente 30%, classificado como de bom desempenho, seguido pelos métodos de Born (33%) e Kurbatova (39%), considerados razoáveis. O método de Scheuer apresentou o pior resultado, com MAPE superior a 50%, indicando baixa precisão.

Na cidade de Bento Gonçalves, os métodos de Kurbatova, Scheuer e o novo método apresentaram valores de RMSE semelhantes e considerados satisfatórios, enquanto a parametrização de Born obteve o maior RMSE entre os métodos avaliados, embora ainda dentro de um desempenho aceitável. Todos os métodos apresentaram tendência à subestimação no BIAS, sendo que o método de Scheuer gerou o menor viés

e o de Born, o maior. O novo método e o de Kurbatova destacaram-se com os melhores resultados de MAPE, em torno de 32%, enquanto Scheuer e Born apresentaram valores de 36% e 39%, respectivamente.

Para Canela, os métodos de Kurbatova e o novo método demonstraram os menores valores de RMSE, variando entre 7,5 km/h e 8,5 km/h. As parametrizações de Born e Scheuer apresentaram RMSEs mais elevados, mas ainda dentro de um desempenho considerado bom. O BIAS revelou uma leve tendência à subestimação nos métodos de Kurbatova e no novo método, enquanto o de Scheuer apresentou tendência à superestimação. A parametrização de Born apresentou o maior viés negativo. No que tange ao MAPE, os métodos de Kurbatova, Born e o novo método apresentaram índices inferiores a 27%, sendo classificados como bons. Já a parametrização de Scheuer superou os 30%, indicando desempenho apenas razoável.

Na localidade de Mostardas, os quatro métodos apresentaram valores de RMSE similares, em torno de 13 km/h. O BIAS indicou que o novo método teve uma leve tendência à superestimação, enquanto os demais métodos (Born, Kurbatova e Scheuer) apresentaram tendência oposta, com subestimação dos valores observados. Os resultados de MAPE foram próximos para Born, Kurbatova e Scheuer, com valores ao redor de 28%, sendo considerados bons. O novo método, no entanto, apresentou MAPE mais elevado, aproximadamente 38%, o que caracterizou um desempenho razoável.

Em Porto Alegre, o novo método destacou-se com o menor RMSE, inferior a 6 km/h, seguido pela parametrização de Kurbatova, com valor ligeiramente acima de 6 km/h. O método de Scheuer apresentou o pior desempenho, com RMSE superior a 10 km/h. Quanto ao BIAS, o novo método apresentou leve tendência à subestimação, enquanto Kurbatova demonstrou pequena tendência à superestimação. O método de Born também indicou subestimação, ao passo que Scheuer revelou uma tendência de superestimação mais acentuada. No caso do MAPE, o melhor desempenho foi do método de Born, com valor em torno de 38%, seguido pelo novo método (aproximadamente 45%). O método de Scheuer obteve o pior resultado, com MAPE superior a 60%.

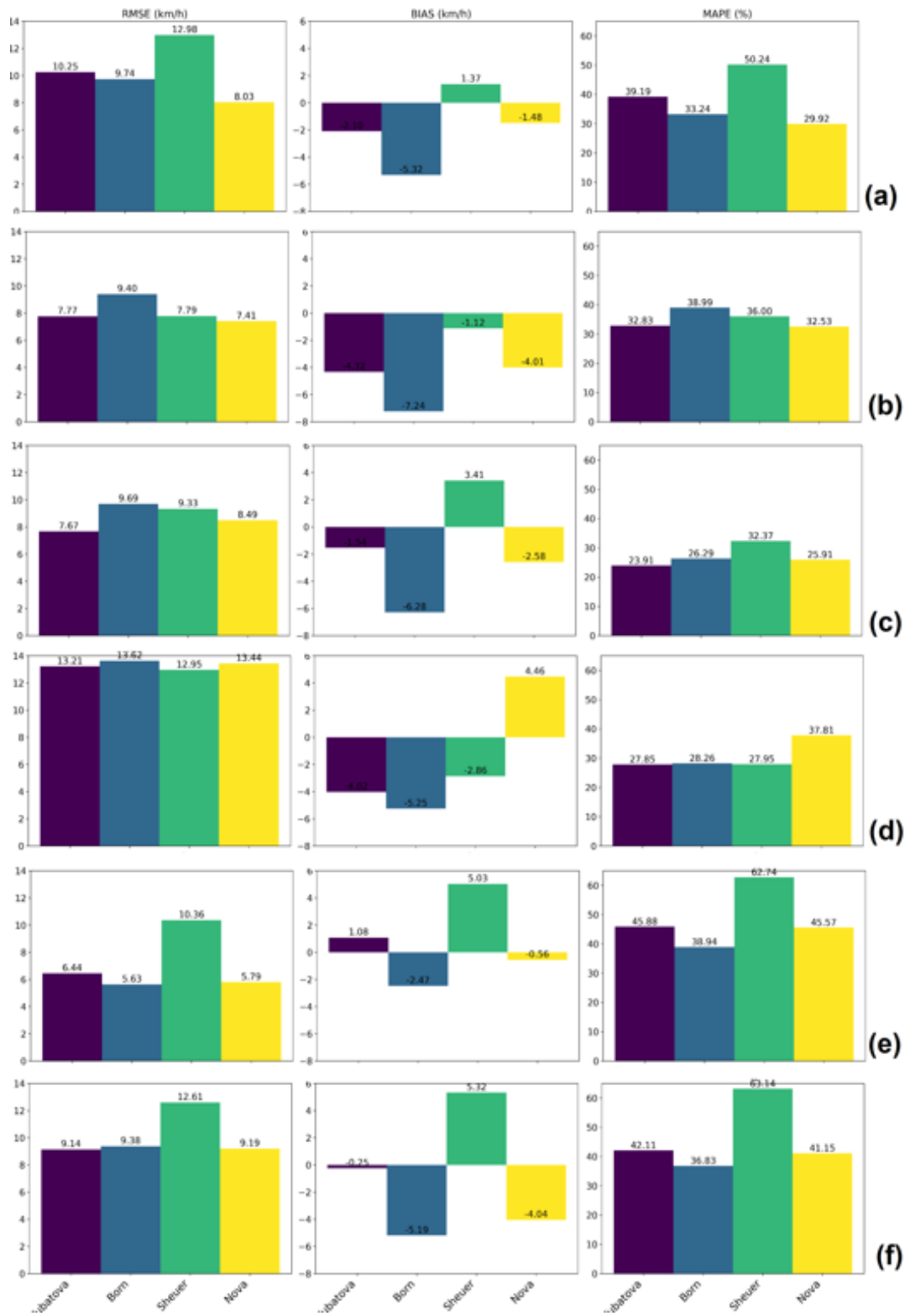


Figura 4. Índices estatísticos dos resultados obtidos a partir das parametrizações de rajadas de vento em comparação com os dados observacionais das EMS do INMET para as localidades de: (a) Bagé, (b) Bento Gonçalves, (c) Canela, (d) Mostardas, (e) Porto Alegre e (f) Santa Maria. As subfiguras apresentam os valores de RMSE, BIAS e MAPE, permitindo a avaliação comparativa do desempenho de cada método de estimativa de rajadas.

Por fim, em Santa Maria, os métodos de Kurbatova, Born e o novo método apresentaram RMSEs semelhantes, próximos de 9 km/h, enquanto Scheuer, novamente, apresentou o maior erro, com cerca de 13 km/h. O BIAS indicou que Kurbatova, Born e o novo método tenderam a subestimar os valores observados, com viés próximo de 5 km/h, enquanto a parametrização de Scheuer apresentou tendência à superestimação. Em relação ao MAPE, o método de Born gerou o melhor resultado, embora com valor ainda acima de 35%. O novo método e o de Kurbatova apresentaram índices próximos de 40%, enquanto Scheuer demonstrou o pior desempenho, com MAPE superior a 60%.

Esses resultados evidenciaram a variabilidade do desempenho das parametrizações em função das condições atmosféricas locais, com destaque para a boa performance do novo método proposto, especialmente em regiões com topografia mais complexa e sob regimes de vento de intensidade moderada.

Comparação entre Métodos de Estimativa de Rajadas

A análise dos índices estatísticos agrupados nas Figuras 3(a-f) evidenciou a sensibilidade das diferentes parametrizações de rajadas de vento às condições locais da atmosfera superficial, especialmente no que se refere à variabilidade da estabilidade da CLA, ao tipo de forçante predominante (mecânica ou térmica) e à complexidade topográfica das regiões analisadas.

A boa performance do novo método proposto, especialmente nos municípios de topografia mais complexa, como Bento Gonçalves e Canela, indicou que a representação do termo turbulento por meio do desvio padrão de uma função senoidal foi eficaz em capturar a oscilação natural da velocidade do vento sob condições de turbulência mista. Esse resultado reforçou a hipótese de que assinaturas oscilatórias da turbulência, mesmo em ambientes caóticos, podem ser representadas de forma simplificada por estruturas harmônicas, conforme argumentado por Belušić e Mahrt (2012). Em outras palavras, o novo método mostrou-se adaptável a situações em que há coexistência de cisalhamento e empuxo, sem depender exclusivamente da parametrização da estabilidade via comprimento de Obukhov.

A parametrização de Kurbatova apresentou um comportamento mais conservador, subestimando os picos, mas com erro médio relativamente baixo e viés pequeno. Esse desempenho foi característico de métodos

projetados para regiões de latitude média e estabilidade atmosférica predominantemente neutra ou estável (Kurbatova et al., 2018). Sua boa performance em áreas como Santa Maria e Canela sugeriu que a abordagem foi eficaz em ambientes com menor influência convectiva e turbulência predominantemente mecânica.

Por outro lado, os métodos de Born e Scheuer apresentaram maior dispersão nos resultados, com tendência à superestimação das rajadas, especialmente em regiões costeiras (Mostardas) e urbanas (Porto Alegre). Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que essas parametrizações foram originalmente calibradas para eventos sinóticos associados a ciclones extratropicais de grande escala (Born et al., 2012; Schreur & Geertsema, 2008), o que limita sua sensibilidade a fenômenos de mesoescala e convecção térmica de menor escala, mas de grande intensidade. A superestimação sistemática observada pode, portanto, refletir uma limitação de escala desses modelos quando aplicados em ambientes subtropicais com forte convecção diurna.

A cidade de Mostardas, por sua localização costeira e influência direta de sistemas convectivos associados à brisa marítima e à penetração de frentes frias, destacou-se por apresentar as maiores limitações em todos os métodos. O fracasso geral das parametrizações em reproduzir adequadamente os picos nesse município apontou para a necessidade de incorporação explícita de componentes convectivas profundas ou de métodos complementares baseados em sensoriamento remoto e dados de radar, conforme sugerido por Lu et al. (2022) e Zulfikar et al. (2023).

De forma geral, os resultados reforçaram que a estimativa de rajadas de vento com base apenas na Energia Cinética Turbulenta apresentou bom desempenho em condições de turbulência moderada a forte, principalmente quando o cisalhamento do vento foi o principal mecanismo de geração de turbulência. Contudo, em situações dominadas por convecção profunda, como observado em Mostardas e, em menor grau, em Porto Alegre, a abordagem espectral baseada na ECT tendeu a perder acurácia. Isso indicou a importância de considerar, em estudos futuros, a inclusão de índices convectivos ou variáveis termodinâmicas adicionais, como CAPE ou fluxo de calor latente, para aumentar a sensibilidade do modelo à presença de núcleos convectivos não resolvidos pela grade do modelo.

Limitações e Perspectivas

Os resultados obtidos neste estudo evidenciaram o potencial de estimativas de rajadas de vento baseadas na ECT, especialmente em ambientes onde a turbulência era predominantemente mecânica. Contudo, os métodos avaliados demonstraram limitações importantes frente à presença de convecção profunda, que não foi devidamente captada por parametrizações baseadas unicamente em variâncias espectrais. A falha recorrente na simulação dos picos de rajadas em Mostardas, por exemplo, apontou para a necessidade de incorporar variáveis termodinâmicas complementares, como o índice de instabilidade CAPE (Convective Available Potential Energy), ou ainda indicadores derivados de campos de radiação e fluxo de calor sensível.

Outra limitação observada referiu-se à aplicação de parametrizações originalmente desenvolvidas para latitudes médias, que podem não responder adequadamente à complexidade atmosférica de regiões subtropicais brasileiras. Essa inadequação foi observada no desempenho variável dos métodos de Born e de Scheuer, indicando a importância de realizar calibrações regionais ou adaptar as equações espectrais às particularidades das condições locais da CLA, incluindo seu regime de estratificação.

Como perspectiva, destacou-se a relevância de avançar na integração entre modelagem física e aprendizado de máquina, permitindo o desenvolvimento de sistemas híbridos que combinem o conhecimento teórico da turbulência com padrões extraídos de grandes volumes de dados observacionais. Além disso, a inclusão de dados de radar meteorológico e de sensoriamento remoto poderá viabilizar a detecção de núcleos convectivos e melhorar a estimativa de rajadas associadas a tempestades locais. Por fim, recomendou-se expandir a aplicação da metodologia proposta para diferentes regiões climáticas e estações do ano, a fim de avaliar sua generalização espacial e sazonal.

Os resultados observados neste estudo refletem desafios semelhantes aos descritos em aplicações de pós-processamento de modelos numéricos (Mohammadi et al., 2024) e em simulações de vento de alta resolução (Gonçalves et al., 2024), evidenciando a importância da seleção de parametrizações físicas e potenciais ganhos com métodos que integrem conhecimento físico e aspectos data-driven.

Conclusões

Este estudo teve como objetivo estimar rajadas de vento a partir do campo de Energia Cinética Turbulenta na CLA, avaliando diferentes parametrizações existentes na literatura e propondo uma nova abordagem baseada na representação senoidal do termo turbulento. A aplicação das metodologias em diferentes contextos atmosféricos e topográficos do sul do Brasil permitiu uma avaliação consistente de seu desempenho e de suas limitações.

Os resultados demonstraram que as parametrizações baseadas na ECT são capazes de representar adequadamente a variabilidade temporal das rajadas de vento, sobretudo em situações dominadas por turbulência mecânica e em eventos de intensidade moderada. Entre os métodos avaliados, a nova parametrização proposta apresentou desempenho estável, com menor tendência à superestimação dos picos de rajada e boa capacidade de acompanhar os ciclos de intensificação e enfraquecimento do vento, especialmente em regiões de topografia mais complexa.

Por outro lado, observou-se que nenhum dos métodos avaliados reproduziu de forma satisfatória episódios associados à convecção profunda, evidenciando limitações inerentes às abordagens baseadas exclusivamente na ECT quando aplicadas a ambientes fortemente convectivos. Esse resultado reforça a necessidade de estratégias complementares para a estimativa de rajadas extremas nesses cenários.

De forma geral, os achados indicam que a Energia Cinética Turbulenta constitui uma base física consistente para a estimativa de rajadas de vento em modelos numéricos, e que a metodologia proposta representa uma alternativa promissora para aplicações operacionais e estudos de risco, desde que considerada dentro de seus limites de aplicabilidade. O trabalho contribui para o aprimoramento das técnicas de parametrização de rajadas e fornece subsídios para o desenvolvimento de métodos mais robustos e adaptados às condições atmosféricas do sul do Brasil.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Referências

Belušić, D., & Mahrt, L. (2012). Is geometry more universal than physics in atmospheric boundary layer flow? *Journal of Geophysical Research:*

- Atmospheres, 117(D9), D09115. <https://doi.org/10.1029/2011JD016987>American Meteorological Society Journals
- Born, K., Ludwig, P., & Pinto, J. G. (2012). Wind gust estimation for Mid-European winter storms: Towards a probabilistic view. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 64, 17471. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.17471>
- Cao, Y., & Fovell, R. G. (2016). Downslope windstorms of San Diego County. Part I: A case study. *Monthly Weather Review*, 144(2), 529–552. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0147.1>
- Castorrini, A., Gentile, S., Geraldi, E., & Bonfiglioli, A. (2023). Investigations on offshore wind turbine inflow modelling using numerical weather prediction coupled with local-scale computational fluid dynamics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 171, 113008.
- Champagne, F. H., Friche, C. A., LaRue, J. C., & Wyngaard, J. C. (1977). Flux measurements, flux estimation techniques, and fine-scale turbulence measurements in the unstable surface layer over land. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 34(3), 515–530. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1977\)034<0515:FMFETA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1977)034<0515:FMFETA>2.0.CO;2)SpringerLink+2ResearchGate+2Colab+2
- Chen, F., & Dudhia, J. (2001). Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 129(4), 569–585. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)
- de Burgh-Day, C. O., & Leeuwenburg, T. (2023). Machine learning for numerical weather and climate modelling: A review. *Geoscientific Model Development*, 16(21), 6433–6472. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-6433-2023>
- Degrazia, G. A., & Moraes, O. L. L. (1992). A model for eddy diffusivity in a stable boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 58(2), 205–214. <https://doi.org/10.1007/BF02033824>
- Degrazia, G. A., Anfossi, D., Carvalho, J. C., Mangia, C., Tirabassi, T., & Velho, H. F. C. (2000). Turbulence parameterization for PBL dispersion models in all stability conditions. *Atmospheric Environment*, 34(22), 3575–3583. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00116-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00116-3)
- Degrazia, G. A., Anfossi, D., Velho, H. F. C., & Ferrero, E. (1998). A Lagrangian decorrelation time scale in the convective boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 86(3), 525–534. <https://doi.org/10.1023/A:1000734626931>SpringerLink+1Grafati+1
- Durrán J. A. , D. R., & Caruana, R. (2020). Improving data-driven global weather prediction using deep convolutional neural networks on cubed spheres. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(48), 30059–30068. <https://doi.org/10.1029/2020MS002109>
- Gatzen, C. P. A historical overview on the science of derechos. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 104, n. 10, p. 2013–2027, 2023. DOI: 10.1175/BAMS-D-22-0217.1.
- Gneiting, T., & Katzfuss, M. (2014). Probabilistic forecasting. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 1(1), 125-151.
- Gonçalves, Layrson de Jesus Menezes et al. Evaluation of a High Resolution WRF Model for Southeast Brazilian Coast: The Importance of Physical Parameterization to Wind Representation. *Atmosphere*, v. 15, n. 5, p. 533, 2024.
- Guerrero-Navarro, G. H., Martínez-Amaya, J., & Nieves, V. (2025). AI-driven ensemble forecasting of extreme wind gusts: Random Forest modeling and case studies from the western Mediterranean. *Big Earth Data*, 1-20.
- Jahan, I., Schreck, J. S., Gagne, D. J., Becker, C., & Astitha, M. (2025). Uncertainty quantification of wind gust predictions in the northeast United States: An evidential neural network and explainable artificial intelligence approach. *Environmental Modelling & Software*, 193, 106595. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106595>
- Jones, A. R., Cetiner, O., & Smith, M. J. (2022). Physics and modeling of large flow disturbances: discrete gust encounters for modern air vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 54(1), 469-493.
- Kurbatova, M., Rubinstein, K., Gubenko, I., & Kurbatov, G. (2018). Comparison of seven wind gust parameterizations over the European part of Russia. *Advances in Science and Research*, 15, 251–255. <https://doi.org/10.5194/asr-15-251-2018>
- Lu, Z., Han, Y., Liu, Y., Liu, S., Tang, Y., Liu, Z., & Wei, J. (2022). An improvement of wind gust estimate (WGE) method for squall lines. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 993–1013.

- <https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2064773>
- Mangia, C., Degrazia, G. A., & Rizza, U. (2000). An integral formulation for the dispersion parameters in a shear–buoyancy-driven planetary boundary layer for use in a Gaussian model for tall stacks. *Journal of Applied Meteorology*, 39(11), 1913–1922. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<1913:AIFDTD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1913:AIFDTD>2.0.CO;2)
- Mathias, L.; Ludwig, P.; Pinto, J. G. Synoptic-scale conditions and convection-resolving hindcast experiments of a cold-season derecho on 3 January 2014 in western Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 19, p. 1023–1040, 2019. DOI: 10.5194/nhess-19-1023-2019.
- Mohammadi, Mohammad Hesam et al. Wind gust forecasting by post-processing the WRF model outputs using ANN. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, v. 105, p. 101425, 2024.
- Piotrowski, P., Rutyna, I., Baczyński, D., & Kopyt, M. (2022). Evaluation metrics for wind power forecasts: A comprehensive review and statistical analysis of errors. *Energies*, 15(24), 9657.
- Rafei, M., Sherwood, S., Evans, J., & Dowdy, A. (2023). Analysis and characterisation of extreme wind gust hazards in New South Wales, Australia. *Natural Hazards*, 117(1), 875–895.
- Rasp, S., Dueben, P. D., Scher, S., Weyn, J. A., Mouatadid, S., & Thuerey, N. (2020). WeatherBench: A benchmark dataset for data-driven weather forecasting. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(42), 25919–25925. <https://doi.org/10.1029/2020MS002203>
- Reboita, M. S., Mattos, E. V., Capucin, B. C., Souza, D. O. D., & Ferreira, G. W. D. S. (2024). A multi-scale analysis of the extreme precipitation in southern Brazil in April/May 2024. *Atmosphere*, 15(9), 1123.
- Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N., & Prabhat. (2019). Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 566(7743), 195–204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>
- Schreur, B. W., & Geertsema, G. (2008). Theory for a TKE based parameterization of wind gusts. *HIRLAM Newsletter*, 54, 177–188. https://www.researchgate.net/publication/242591870_Theory_for_a_TKE_based_parametrization_of_wind_gusts
- Sheridan, P. (2011). Review of techniques and research for gust forecasting and parameterization. *Forecasting Research Technical Report*, 570. https://www.researchgate.net/publication/268744498_Review_of_techniques_and_research_for_gust_forecasting_and_parameterisation
- Sorbjan, Z. (1989). *Structure of the atmospheric boundary layer*. Prentice Hall.
- Suomi, I., & Vihma, T. (2018). Wind gust measurement techniques—From traditional anemometry to new possibilities. *Sensors*, 18(4), 1300.
- Trassante, F. C., de Freitas, R. A. P., Nedel, A. S., Machado, R. M., de Medeiros, M. A. F., da Silva Lindemann, D., & Alonso, M. F. (2024). Analysis of thermal discomfort associated with synoptic conditions in the city of Pelotas, southernmost region of Brazil. *International Journal of Biometeorology*, 68(3), 463–477.
- Weyn, J. A., Durran, D. R., & Caruana, R. (2020). Improving data-driven global weather prediction using deep convolutional neural networks on cubed spheres. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(48), 30059–30068. <https://doi.org/10.1073/pnas.2005535117>
- Wilson, J. D., & Sawford, B. L. (1996). Review of Lagrangian stochastic models for trajectories in the turbulent atmosphere. *Boundary-layer meteorology*, 78(1), 191–210.
- WMO (2023). *Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8, Volume II)*.
- Yan, Bowen et al. Characterization of wind gusts: a study based on meteorological tower observations. *Applied Sciences*, v. 12, n. 4, p. 2105, 2022.
- Zhou, L., Zhang, D., Zhang, L., & Zhu, J. (2024). Dynamic Gust Detection and Conditional Sequence Modeling for Ultra-Short-Term Wind Speed Prediction. *Electronics*, 13(22), 4513.
- Zulfikar, M. R., Abdillah, M. R., & Sarli, P. W. (2023). Wind gust parameterization assessment under convective and non-convective events: A case study at the Kertajati International Airport. *Jurnal Ilmu Fisika*, 15(2), 175–187.