



University of
Texas Libraries



e-revist@s



Centro Unversitário Santo Agostinho

revistafsa

www4.fsnet.com.br/revista

Rev. FSA, Teresina, v. 21, n. 1, art. 9, p. 150-168, jan. 2024

ISSN Impresso: 1806-6356 ISSN Eletrônico: 2317-2983

<http://dx.doi.org/10.12819/2024.21.1.9>

DOAJ DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

WZB
Wissenschaftszentrum Berlin
für Sozialforschung



MIAR



Estimação dos Coeficientes da Função Weibull para Análise dos Parâmetros Eólicos: Um Estudo de Caso em Macaé, RJ

Estimation of Weibull Function Coefficients for Wind Parameter Analysis: A Case Study in Macaé, RJ

André Luiz Xavier Guimarães Nasri

Graduação em Engenharia Meteorológica pela UENF
Bolsista de Pesquisa na UENF
E-mail: dedeluzinasri@gmail.com

Hans Schmidt Santos

Doutor em Geofísica pelo Observatório Nacional
Coordenador de Pesquisa e Extensão na FCSMA
E-mail: hans.schmidt@live.com

Pedro Scarpini Gomes Gnapp

Graduação em Engenharia Meteorológica pela UENF
Bolsista de Pesquisa na UENF
E-mail: scarpinipedro@gmail.com

Rayssa Barcellos Paiva

Graduado em Engenharia de Produção pela FCSMA
E-mail: rayssabpaiva@hotmail.com

Gustavo Rimes Bogea Felix

Graduação em Engenharia Química pela FCSMA
E-mail: gus.rimes.bf@gmail.com

Endereço: André Luiz Xavier Guimarães Nasri

UENF, Av. Alberto Lamego, 2000 - Parque Califórnia,
Campos dos Goytacazes - RJ, 28013-602. Brasil.

Endereço: Hans Schmidt Santos

FCSMA, Av. Santos Moreira, 445 - Miramar, Macaé -
RJ, 27943-200 Brasil.

Endereço: Pedro Scarpini Gomes Gnapp

UENF, Av. Alberto Lamego, 2000 - Parque Califórnia,
Campos dos Goytacazes - RJ, 28013-602. Brasil.

Endereço: Rayssa Barcellos Paiva

FCSMA, Av. Santos Moreira, 445 - Miramar, Macaé -
RJ, 27943-200

Endereço: Gustavo Rimes Bogea Felix

FCSMA, Av. Santos Moreira, 445 - Miramar, Macaé -
RJ, 27943-200

Editor-Chefe: Dr. Tonny Kerley de Alencar Rodrigues

Artigo recebido em 23/11/2023. Última versão recebida em 14/12/2023. Aprovado em 15/12/2023.

Avaliado pelo sistema Triple Review: a) Desk Review pelo Editor-Chefe; e b) Double Blind Review (avaliação cega por dois avaliadores da área).

Revisão: Gramatical, Normativa e de Formatação



RESUMO

O objetivo deste artigo é estimar os parâmetros de escala e forma da Função Densidade de Probabilidade (FDP) Weibull para analisar a distribuição do vento na cidade de Macaé, RJ. O estudo eólico abordou as estações meteorológicas das localidades Glória, Estrada de Morro Grande, Miramar, Mirante da Lagoa, Parque Aeroporto e Trapiche, considerando diferentes temporadas do ano, no intervalo de outono de 2021 ao verão de 2022. Após realizar os tratamentos estatísticos nos bancos de dados, otimizou-se os coeficientes da FDP para melhor se ajustarem as colunas dos histogramas, plotados individualmente para cada região, e, além disso, a pesquisa avaliou o comportamento sazonal de cada área. Como resultado, inferiu-se quais aplicações urbanas de exploração do recurso eólico podem ser indicadas para cada localidade, baseado, entre outros fatores, na estimativa da potência eólica desenvolvida para um aerogerador médio.

Palavras-Chave: Disponibilidade Eólica. Função Weibull. Planejamento Urbano. Potencial Eólico.

ABSTRACT

This paper aims to estimate the scale and shape parameters of the Weibull Probability Density Function (PDF) to analyze the wind distribution in the city of Macaé, RJ. The wind study covered the meteorological stations in the following locations: Glória, Estrada de Morro Grande, Miramar, Mirante da Lagoa, Parque Aeroporto, and Trapiche, considering different seasons of the year from autumn 2021 to summer 2022. After performing statistical analyses on the databases, the coefficients of the PDF were optimized to better fit the histograms columns, plotted individually for each region. Additionally, the research evaluated the seasonal behavior of each area. As a result, it was inferred which urban applications of wind resource exploitation can be recommended for each locality, based, among other factors, on the estimated wind power developed for an average wind turbine.

Keywords: Urban Planning. Weibull Function. Wind Availability. Wind Potential.

1 INTRODUÇÃO

Destaque em vários debates de promoção de ideias ambientais, como a coletânea indexadora de artigos climáticos WG1-AR6 (*Working Group 1 - Assessment Report 6*) de 2021, distribuída pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), o regime eólico de uma determinada localidade requer diferentes tipos de análises estatísticas para precisar suas peculiaridades regionais que o diferem da circulação global. Sabe-se que o vento é definido pela forma na qual a energia solar é redistribuída ao redor do globo, direcionando a circulação atmosférica em métricas de diferentes escalas (SALVI; FERREIRA, 2008).

O regime dos ventos, nessa condição, mostra-se como o mecanismo atmosférico de transporte de calor e umidade ao redor do planeta, desempenhando um papel fundamental na dinâmica do clima e na intensificação dos fenômenos temporais. Em decorrência, explica-se que o aquecimento desuniforme da atmosfera, ocasionado pela topografia, vegetação e dinâmica oceânica das regiões equatoriais e tropicais, ou, em maior proporção, pela angulação do orbe terrestre em relação a projeção dos raios solares nas regiões polares, torna a variável eólica um requisito essencial para se compreender o clima de diferentes partes do mundo nas grandezas micro, macro e meso (YNOUE *et al.*, 2017).

Dentre as características intrínsecas do vento, compreende-se a sazonalidade como a mais importante para um planejamento que envolva participação do potencial eólico, haja vista as diferentes dimensões da régua sazonal e seus desdobramentos análogos. A direção do vento é alterada conforme a existência de centros de baixa e alta pressão, conhecidos como zona ciclone e anticiclone, respectivamente, que se realocam regularmente, seja pela diferença de variabilidade térmica da superfície oceânica em relação à continental, que conserva calor ao entardecer, pelas estações do ano ou por fenômenos anômalos como o El Niño, todos com uma diferença clara de casualidade.

Sabe-se que o regime de ventos do município de Macaé é fortemente influenciado pelo fenômeno do Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS) e por frentes frias, principalmente na costa municipal. Outrossim, ao longo desse litoral, a influência da mesoescala ocorre por meio de brisas marinhas e terrestres que criam um ciclo diurno característico. No entanto, na serra macaense, há outros fenômenos importantes além das brisas, como o escoamento atmosférico acentuado (PEREIRA *et al.*, 2022).

Conforme Sobral *et al.* (2018), pesquisas abordando o padrão de variação e direção dos ventos podem auxiliar em um melhor planejamento urbano, industrial e agropecuário, contribuindo para a identificação dos locais mais apropriados à instalação de conjuntos

residenciais, polos industriais, captadores de energia eólica, lavouras e estábulos. Em adição, esse tipo de estudo também pode influenciar no posicionamento de fontes poluidoras, em melhorias nos sistemas térmicos e nos estudos sobre a qualidade do ar. Desse modo, os ventos urbanos têm uma ampla variedade de aplicações, desde a ventilação natural, melhorando a condição do ar no interior de edifícios, até a dispersão de poluentes para reduzir a concentração de aerossóis venenosos.

Dentre as aplicações mencionadas no parágrafo supra, destaca-se que as fontes renováveis de energia têm atraído cada vez mais atenção como uma alternativa aos combustíveis fósseis e matéria nuclear, detendo 46,1% da matriz energética brasileira (KASSAI; CARMONA, 2019). Nesse contexto, sabe-se que a energia eólica é uma grande fonte de energia verde no Brasil, pois representa 7% da matriz total produzida e pode ser explorada ao longo da dimensão continental da costa litorânea do país (SILVA *et al.*, 2021). No entanto, como parte de um sistema dinâmico, a produção de energia eólica é altamente dependente das condições climáticas regionais, precipuamente sazonalidade, como dissertado anteriormente, requisitando uma interpretação assertiva do cenário estudado.

Como estratégia essencial para se realizar uma modelagem eficiente dos ventos, é imprescindível a adoção da técnica estatística de distribuição de frequências, em formato de histograma, uma vez que esse modelo descreve a disposição de dados em intervalos pré-determinados e os divide em classes menores ao longo da escala, possibilitando, assim, a aplicação de diversas Funções Densidade de Probabilidade (FDP) (NAVIDI, 2020).

Com base na contextualização precedente, explica-se que o presente artigo visou determinar a disponibilidade eólica e o comportamento sazonal dos ventos no município de Macaé e, para que o objetivo elencado fosse concluído com êxito, optou-se por modelar computacionalmente o método estatístico da curva de Weibull para ajustá-lo às frequências das médias diárias da velocidade do vento nos bairros macaenses Glória, Miramar, Mirante, Parque Aeroporto, Trapiche e Estrada de Morro Grande. Destaca-se, à vista disso, que a distribuição de probabilidade escolhida é caracterizada pelos parâmetros de escala e forma, que estão associados à velocidade média do vento e à expectativa de ocorrência de ventos fracos ou fortes, ambas em uma determinada localização comum e em um mesmo intervalo, respectivamente (SANSIGOLO, 2005).

O formato da distribuição foi ajustado mesmo frente a diferentes condições sazonais e a curva foi adaptada da melhor maneira às frequências de cada estação meteorológica. Adicionalmente, após a estipulação dos fatores de escala e forma de todos os bancos de dados,

foi realizada uma extrapolação do dimensionamento do potencial eólico na localidade que apresentou os melhores índices sazonais.

Dessarte a problemática e o objeto apresentados, a presente pesquisa discorre, na seção de Metodologia, sobre as estações meteorológicas utilizadas para observação das variáveis climáticas, a técnica estatística de preenchimento de dados ausentes pelo erro relativo e a distribuição de probabilidade discreta utilizada para avaliar o comportamento dos ventos bem como as equações utilizadas para extrapolar o vento em altitude e dimensionar o potencial eólico. Além disso, em Resultados e Discussão, estão dispostas as médias das velocidades sazonais do vento, as distribuições de frequências e a estimação dos parâmetros da função Weibull apresentadas por meio de gráficos com a curva ajustada às classes para cada localidade e, também, são discutidos os resultados. De forma sintética, na conclusão, estão sumarizados os principais resultados obtidos ao longo do estudo, assim como sugestões que podem ser adotadas em futuras pesquisas.

2 METODOLOGIA

O presente estudo é fruto de uma estratégia metodológica de pesquisa empírica que pode ser compreendida em três etapas: 1 - Obtenção e tratamento dos bancos de dados. 2 - Estimação dos parâmetros de escala e forma. 3 - Interpretação e discussão dos resultados. Citam-se, também, os programas *Microsoft Excel* e *GNU Octave* como principais ferramentas utilizadas durante todo o processo de pesquisa.

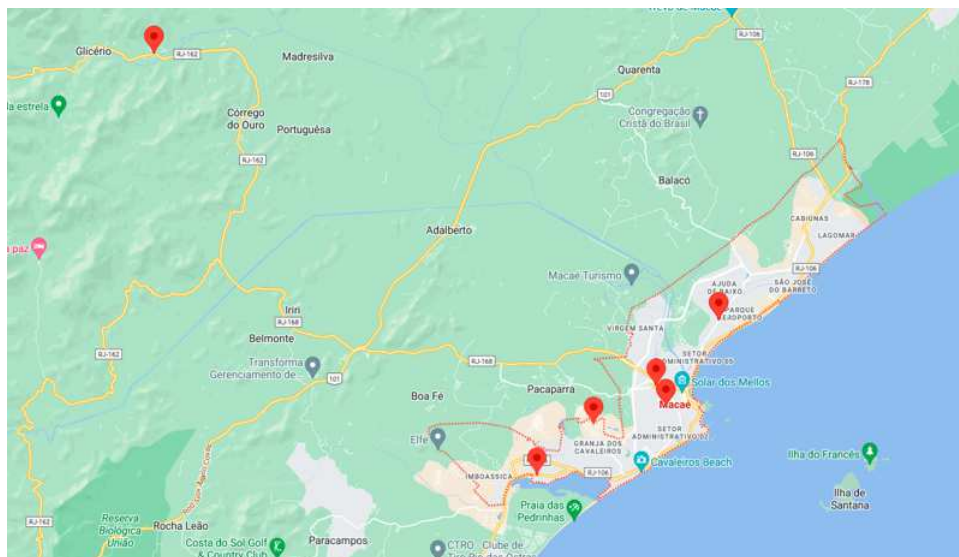
Consoante a primeira etapa, coletou-se os dados de velocidade média diária do vento, começando no primeiro dia do outono de 2021 e concluindo no último dia do verão de 2022, totalizando 367 dias, cedidos por seis estações meteorológicas situadas em diferentes bairros do município de Macaé. Essas estações pertencem ao projeto de extensão “Tempo” de Aprender em “Clima” de Ensinar promovido pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), pelo Aeroporto de Macaé Joaquim de Azevedo Mancebo e o pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As localidades e as coordenadas de cada estação podem ser encontradas na Tabela 01 e na Figura 01 abaixo.

Tabela 01 – Localidades e Coordenadas da Estações Meteorológicas Estudadas.

Estação	Latitude	Longitude
Glória (IMACA15)	-22,401273	-41,802044
MC 81 – Estrada de Morro Grande (A608)	-22,376370	-41,812090
Miramar (IMACA06)	-22,379042	-41,786816
Mirante da lagoa (IMACA07)	-22,408706	-41,847345
Parque Aeroporto (MAE)	-22,341800	-41,763240
Trapiche (IMACA13)	-22,229555	-41,018193

Fonte: Autores, 2023.

Figura 01 – Distribuição Espacial das Estações Meteorológicas Estudadas.



Fonte: LANDSAT, 2022.

Após a coleta dos registros, mostrou-se necessário mensurar a quantidade de dados ausentes em cada banco para avaliar se um processo de imputação seria adequado. Conforme Nunes, Klück e Fachel (2009), o método de imputação de variáveis pode ser considerado preciso em bancos com até de 5% de dados faltantes, podendo apresentar variações relevantes caso os valores ausentes estejam próximos ou superiores à métrica de 20%. Com base nisso, calculou-se o percentual de dados a serem imputados em cada banco através da Equação 01 e o resultado pode ser visto na Tabela 02.

$$\varphi = \frac{(NA)}{(Amostra Total)} \cdot 100 \tag{01}$$

Onde:

ϕ = percentual de dados ausentes;

NA = quantidade total de dados ausentes;

Amostra Total = quantidade total de dias estudados.

Tabela 02 – Quantidade de Dados Ausentes por Estação.

Estação	Quantidade de Dados Ausentes	% de Dados Ausentes
Glória	33	8,99%
MC 81 – Estrada de Morro Grande	66	17,98%
Miramar	127	34,60%
Mirante da Lagoa	55	14,99%
Parque Aeroporto	0	0,00%
Trapiche	17	4,63%

Fonte: Autores, 2023.

Como se pode observar na Tabela 02, as estações de Mirante da Lagoa e Estrada de Morro Grande aproximaram-se do valor determinado por Nunes, Klück e Fachel (2009) como impreciso; e a estação de Miramar ultrapassou esse percentual. Observa-se, no entanto, que a estação Parque Aeroporto não apresenta nenhum dado faltante e, por conta disso, mostrou-se um banco de dados propício a ser utilizado como base de imputação das demais estações através do método de correção pelo erro relativo.

Segundo Fernandes *et al.* (2022), as velocidades médias do vento apresentam uma oscilação considerável dependendo da temporada, outono, inverno, primavera ou verão. Por conta disso, para o processo de preenchimento de valores faltantes nos bancos de dados, calculou-se as médias das velocidades sazonais do vento, por estação do ano, dos bancos de dados corretivos e a serem imputados. Após isso, fez-se a imputação dos dados ausentes por meio da multiplicação do valor pontual do banco de dados corretivo com a razão da média da velocidade sazonal do vento no banco a ser imputado pela média da velocidade da mesma temporada no banco corretivo, como disposto na Equação 02.

$$\bar{V} = a \frac{\bar{x}_b}{\bar{x}_a} \quad (02)$$

Onde:

\bar{V} = velocidade pontual do vento no banco de dados a ser imputado;

a = velocidade pontual do vento no banco corretivo (Parque Aeroporto);

\bar{x}_b = média da velocidade sazonal do vento no banco a ser imputado;

\bar{x}_a = média da velocidade sazonal do vento no banco corretivo (Parque Aeroporto).

Em seguida, munido dos bancos de dados tratados, precisou-se assumir uma representação gráfica para posteriormente aplicar a FDP. Motivado por essa necessidade, escolheu-se o modelo de histograma, gráfico com dados expressos por meio de barras, para distribuir as frequências de velocidade do vento no eixo horizontal. Nota-se que foi necessário intervalar a disposição dos eventos em classes e distribuir as ocorrências em colunas que representam a amplitude de frequência da velocidade do vento em cada localidade investigada; dessa forma, os gráficos expõem as médias de maior ocorrência da velocidade do vento e possibilitam a implementação da função Weibull.

Como proposto por Weibull (1951), a distribuição de Weibull acompanha uma variável aleatória x que varia ao longo do tempo, com o parâmetro de escala (λ) determinando a localização da distribuição no eixo x e o parâmetro de forma (k) determinando a curvatura. A Equação 03 expõe discriminadamente essa relação.

$$f(x; \lambda; k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (03)$$

Onde:

$f(x; \lambda; k)$ = distribuição de Weibull;

x = variável aleatória;

λ = parâmetro de escala da distribuição;

k = parâmetro de forma da distribuição.

Em posse dos histogramas e uma vez modelada a FDP selecionada, os parâmetros λ e k foram estimados graficamente para melhor se ajustarem à distribuição de frequências, revelando informações acerca da velocidade média e a constância dos ventos.

Como estratégia para complementar o estudo, efetuou-se uma análise mais aprofundada dos dados pertencentes à localidade de melhor desempenho na função Weibull. Dessa forma, avaliou-se o perímetro da localidade para estipular a rugosidade da região, conforme Tabela 03, e se extrapolou, por intermédio da Equação 04, a velocidade média anual do vento para 80 metros de altura, elevação média de um aerogerador. Calculou-se, então, o potencial eólico dessa localidade através da equação geral de potência de aerogeradores, como exposto na Equação 05, visando a uma projeção mais condizente com o observado neste estudo de caso.

Tabela 03 – Indicadores de Rugosidade nos Terrenos.

Terreno	Zo (m) Mín.	Zo (m) Máx.
Gelo/Lama	0,00001	0,00003
Mar Calmo	0,0002	0,003
Areia	0,0002	0,001
Neve	0,001	0,006
Campo de Cereais	0,001	0,01
Gramma Curta	0,01	0,04
Descampado	0,02	0,03
Gramma Alta	0,04	0,1
Terreno com Árvores	0,1	0,3
Floresta	0,1	1
Perímetro Urbano	1	2

Fonte: FERNANDES *et al.* (2022).

$$\frac{V(h_1)}{V(h_2)} = \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (04)$$

Onde:

h_1 = altura um;

h_2 = altura dois;

V = velocidade do vento;

Z_0 = rugosidade do terreno.

$$P = \frac{1}{2} \rho A_r V^3 C_p \eta \quad (05)$$

Onde:

P = potência do vento em Watts;

ρ = densidade do ar (1,225 kg/m³ no nível do mar e a 15°C);

A_r = área de rotação da pá do aerogerador (é igual a $(\pi D^2) / 4$ com D sendo o diâmetro da pá);

C_p = coeficiente de aerodinâmica (valor teórico máximo de 0,593);

V = parâmetro de escala da função Weibull;

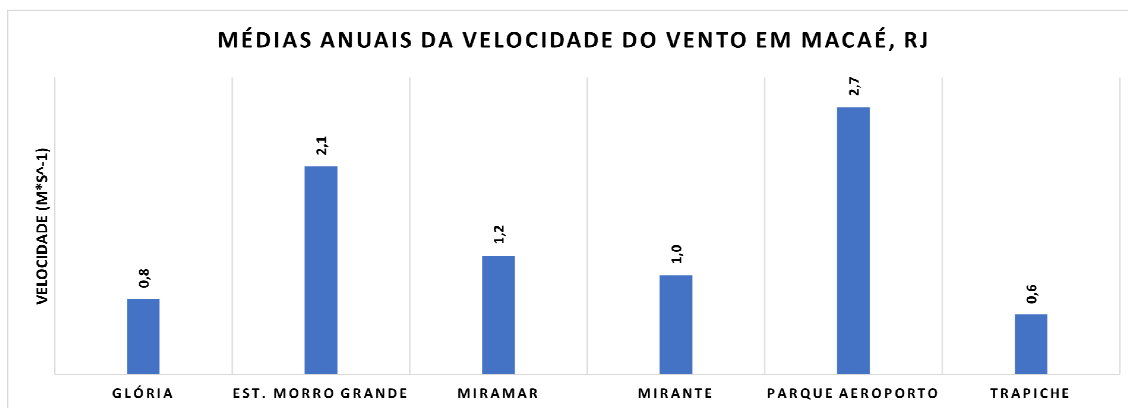
η = eficiência do aerogerador (varia de 0,93 a 0,98).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Unísono ao que foi explicado nos parágrafos anteriores, foram confeccionados gráficos de média anual (Gráfico 01) e média sazonal (Gráfico 02) das velocidades dos ventos

e distribuição de Weibull (Gráficos 3 a 8) com estimação dos parâmetros e cálculo da estimação da potência do vento a 80 metros de altura (Tabelas 04 e 05) na região de melhor desempenho.

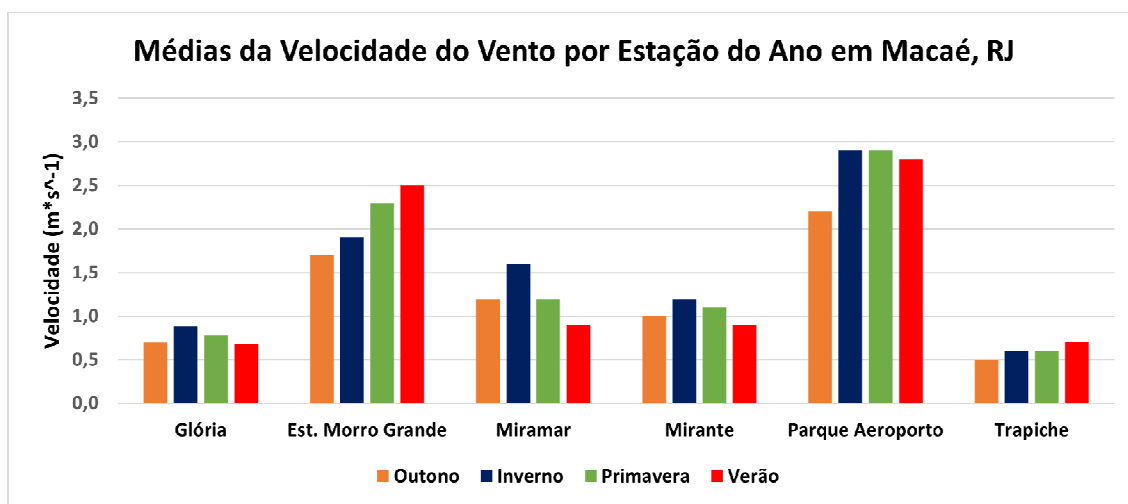
Gráfico 01 – Médias Anuais da Velocidade do Vento em Macaé, RJ.



Fonte: Autores, 2023.

A análise da velocidade média anual do vento nessas regiões indica que o recurso eólico é comedido ao longo de todo o município. Apenas as regiões de Parque Aeroporto e Estrada de Morro Grande demonstram uma média anual relevante para que seja realizado um estudo de caso para planejamento urbano de aplicação eólica. Evidencia-se que analisar o vento na escala anual não contempla o nível de detalhamento requerido para dirimir questões que exigem um aprofundamento no comportamento do vento regional, sendo necessário, portanto, abordar a sazonalidade de Macaé. Mostra-se isso por intermédio do Gráfico 02, que se refere às variações no padrão dos ventos macaenses ao longo do ano.

Gráfico 02 – Médias Sazonais da Velocidade do Vento em Macaé, RJ.

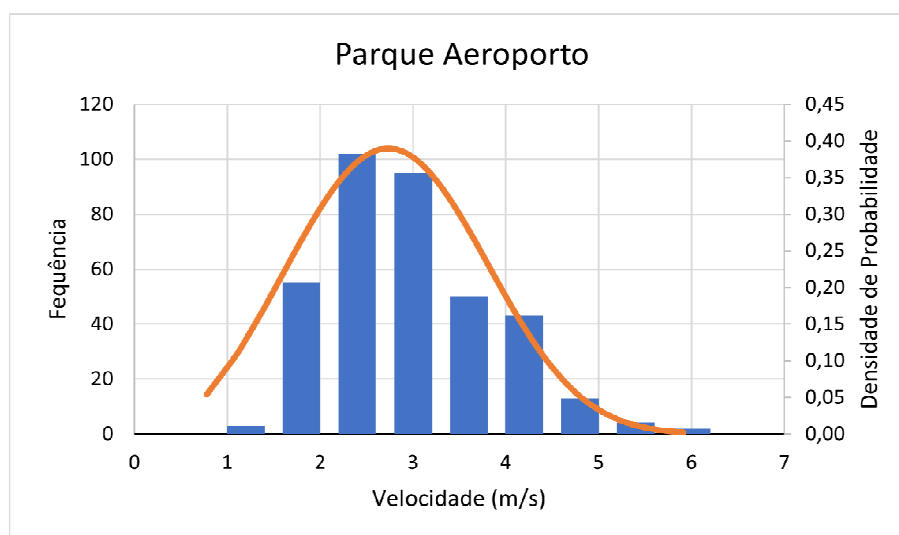


Fonte: Autores, 2023.

Nota-se, principalmente por se tratar de uma região litorânea, que os ventos de verão tendem a apresentar maiores velocidades médias, pois, a diferença de temperatura entre o oceano e a terra está no seu ápice anual. Este comportamento, no entanto, não foi perceptível nos bairros de Miramar e Mirante da Lagoa, que registraram os ventos mais vagarosos no verão e, por outro lado, constatou-se que a velocidade dos ventos se sobressaiu no inverno dessas localidades.

Cita-se, então, sobre o que pode ser observado nos histogramas após a adição da função Weibull, que todas as distribuições compreendem 10 classes de corte baseadas na amplitude total da velocidade dos ventos com as frequências anuais distribuídas dentro desses intervalos.

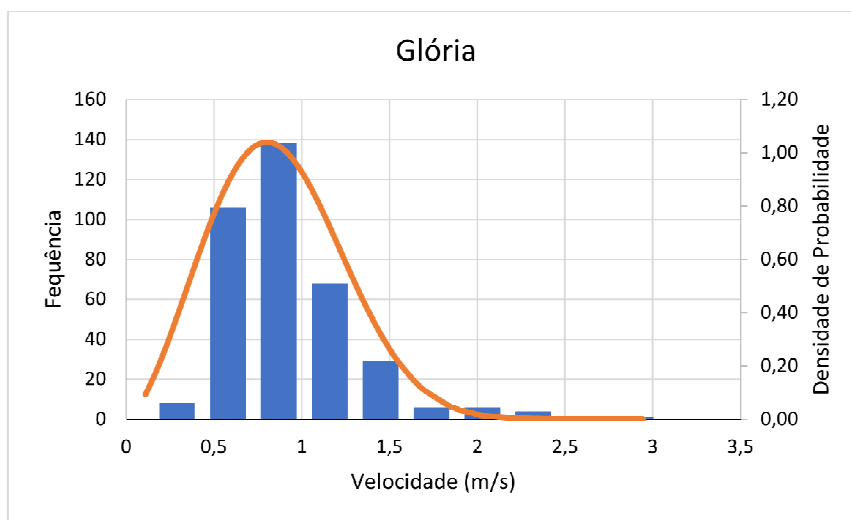
Gráfico 03 – FDP Weibull Aplicada ao Parque Aeroporto.



Fonte: Autores, 2023.

Nota-se, através do observado na curva do Gráfico 02, que o bairro Parque Aeroporto contempla maiores ocorrências de velocidades entre 2,3 e 3,15 m/s. Os parâmetros encontrados foram $\lambda = 3,1$ e $k = 3,1$, mostrando que a disposição do recurso eólico é mais constante ao longo do ano, quando comparado às demais estações meteorológicas consideradas neste estudo. De todo modo, os índices dos coeficientes de Weibull denotam exíguo potencial e disponibilidade eólica para fins destinados à produção energética, mas contemplam a possibilidade do uso mecânico por meio de moinhos de vento, bombeamento de água e dissipação de poluentes, auxiliando na agricultura e no controle da poluição local.

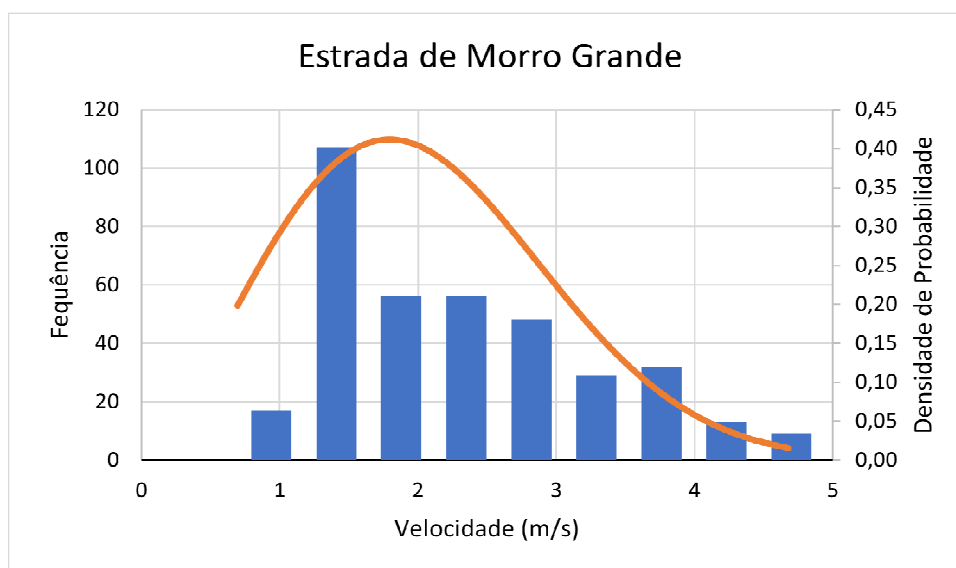
Gráfico 04 - FDP Weibull Aplicada a Glória.



Fonte: Autores, 2023.

Constata-se, em relação ao bairro Glória, que o intervalo com maiores frequências de eventos está delimitado entre as colunas de 0,75 a 1 m/s e os parâmetros que melhor se ajustaram à distribuição são $\lambda = 1,07$ e $k = 1,15$. O resultado implica que a localidade demonstra um baixo potencial eólico, dispondo de ventos brandamente inferiores a 1 m/s nas quatro estações do ano com um comportamento regular pouco afetado pela sazonalidade. Diferentemente do Parque Aeroporto, o presente bairro não dispõe de recurso eólico suficiente para aplicações urbanas mais sofisticadas, como as baseadas na força mecânica dos ventos.

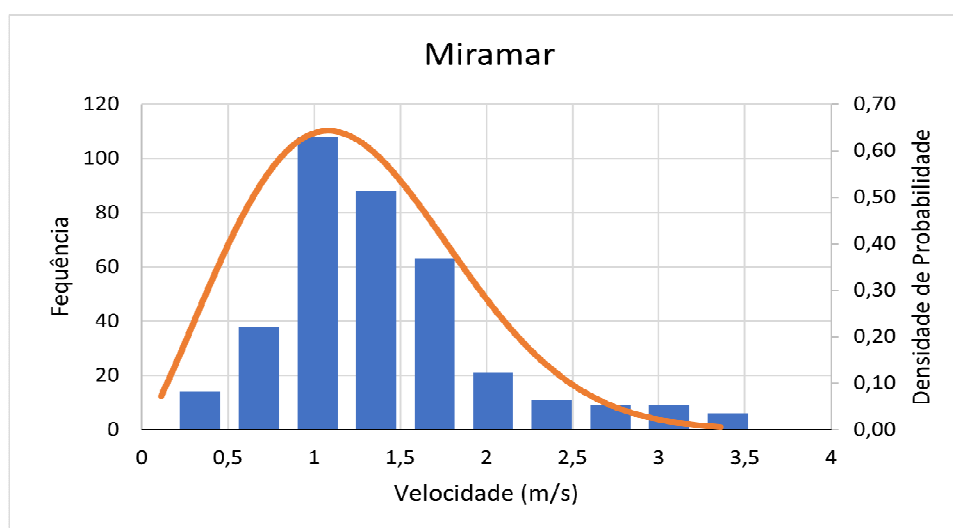
Gráfico 05 – FDP Weibull Aplicada a Estrada de Morro Grande.



Fonte: Autores, 2023.

Percebe-se, em primeiro lugar, que a relevante quantidade de classes distintas implica uma grande inconstância na disponibilidade do recurso eólico. Além disso, nota-se que a região da Estrada de Morro Grande apresenta um comportamento sazonal instável, com ventos que variam muito sua velocidade e se mostram irregularmente crescentes ao longo do ano. Os coeficientes de Weibull foram $\lambda = 2,3$ e $k = 2,3$, garantindo ventos mais velozes e de maior potência do que os registrados nos bairros Glória, Miramar, Mirante da Lagoa e Trapiche, mas ainda aquém do esperado para aplicações urbanas mais complexas do que ventilação natural e controle de poluição.

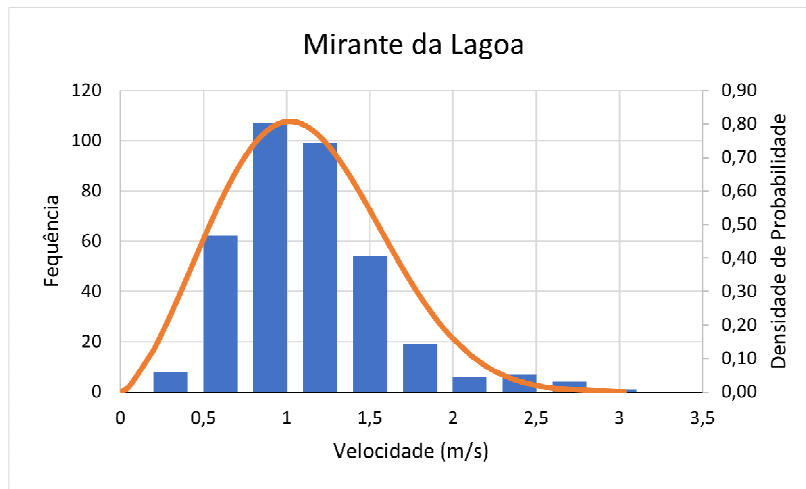
Gráfico 06 - FDP Weibull Aplicada a Miramar



Fonte: Autores, 2023.

No Gráfico 06, está disposto o ajuste da curva de Weibull ao histograma do bairro Miramar e, como é possível identificar pelas colunas, a intensidade do vento se mostra recorrente por volta de 1,3 m/s ao longo do ano com poucas observações de ventos que ultrapassam os 3 m/s. Nesse ínterim, os parâmetros da curva que melhor se adequou ao histograma foram $\lambda = 1,43$ e $k = 2,2$, expondo que a estimativa da velocidade média do vento é efetivamente comparada com a leitura registrada no banco de dados. Dessa forma, afirma-se que o bairro apresenta um bom potencial para ventilação natural em edifícios residenciais e comerciais, desde que sejam consideradas brisas que sopram tanto do continente quanto do mar.

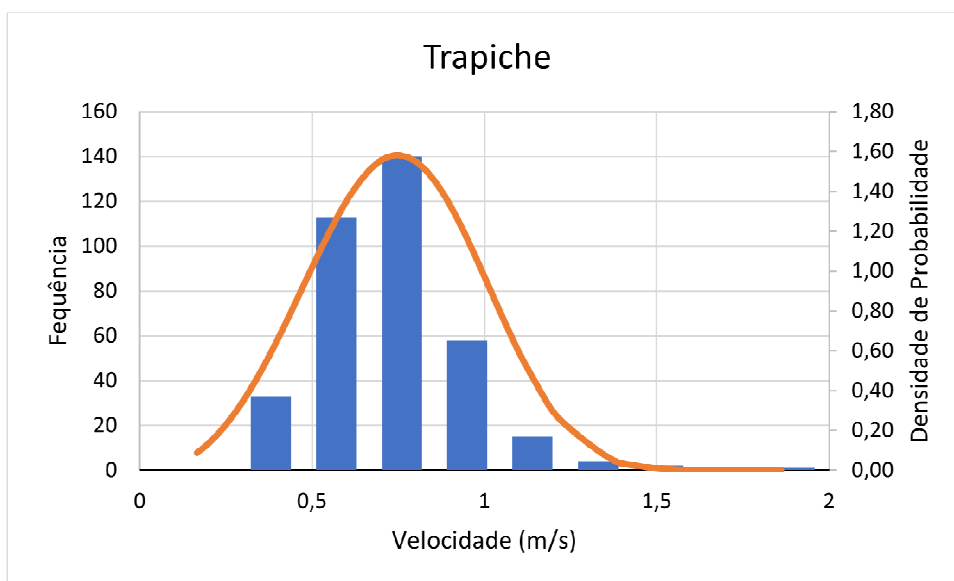
Gráfico 07 - FDP Weibull Aplicada ao Mirante da Lagoa.



Fonte: Autores, 2023.

Acordante ao bairro Glória, o Mirante apresenta uma maior ocorrência de ventos por volta de 0,75 a 1,25 m/s, mas contém algumas leituras de ventos até 3 m/s. Os coeficientes de Weibull foram $\lambda = 1,25$ e $k = 2,5$, inferindo que a disponibilidade eólica é constante ao longo do ano e que os ventos por volta de 1 m/s podem ser observados em todas as temporadas. Por apresentar uma determinada regularidade sazonal e um comportamento dos ventos semelhante ao bairro Miramar, estipula-se que o Mirante também tenha potencial para ventilação natural contemplando as brisas continentais e marítimas.

Gráfico 08 - FDP Weibull Aplicada ao Trapiche.



Fonte: Autores, 2023.

Vale destacar que o bairro Trapiche apresentava uma característica que o difere das demais regiões, sua posição geográfica aponta para a presença do fenômeno de brisa de vale e montanha, como exposto na Figura 02.

Figura 02 – Identificação do bairro Trapiche entre dois corpos de relevo.



Fonte: LANDSAT, 2023.

Explica-se que a brisa de vale ocorre em áreas montanhosas durante o dia, quando o ar quente ascende do centro de alta pressão, vale, para o centro de baixa pressão, montanha. A brisa de montanha, por sua vez, ocorre durante a noite, quando os centros de alta e baixa pressão se invertem e o ar frio do topo das montanhas descendem até o vale. Dada essa explicação, nota-se que o bairro apresentou velocidades muito baixas, com as maiores incidências variando de 0,5 a 0,75 m/s e parâmetros $\lambda = 0,83$ e $k = 3,4$, o que sugere que a disponibilidade eólica da região segue a tendência e se mantém estável durante todas as estações do ano, porém, sem relevância potencial para que aplicações urbanas sejam recomendadas no bairro.

Uma vez apurado que o bairro Parque Aeroporto apresenta os melhores índices de mensuração de disponibilidade e potencial eólico ao longo do ano, utilizou-se a Equação 04 com os dados para extrapolar sua velocidade média para 80 metros de altura, valor padrão para cálculo de potência do vento visando turbinas eólicas. Ressalta-se que a rugosidade do terreno foi caracterizada como 0,3, de acordo com o observado na Figura 03. O valor da velocidade extrapolada e as variáveis aplicadas na equação encontram-se parametrizados na Tabela 04.

Figura 03 – Identificação da Rugosidade do Terreno Circundante ao Aeroporto de Macaé.



Fonte: LANDSAT, 2023.

Tabela 04 – Variáveis da Equação de Extrapolação da Velocidade do Vento para 80 metros.

Variável	Símbolo	Valor
Velocidade	V_1	2,7 m/s
Altura 1	H_1	10 m
Altura 2	H_2	80 m
Rugosidade do Terreno	Z_0	0,3
Resultado	V_2	4,3 m/s

Fonte: Autores, 2023.

Em posse desse resultado, 4,3 m/s de vento esperado, determinou-se, através da Equação 05, a potência do vento em um aerogerador de médio porte. Mediu-se que o Parque Aeroporto é capaz de gerar aproximadamente 0,14 MW de energia, como mostra a Tabela 05, uma quantidade considerada insuficiente para motivar um investimento em parques eólicos ou na geração doméstica.

Tabela 05 – Variáveis da Equação de Potência do Vento no Parque Aeroporto.

Variável	Símbolo	Valor
Densidade do Ar	ρ	1,225 kg/m ³
Área de Rotação da Pá	A_r	$\frac{\pi 80^2}{4}$ m ²
Altura 2	H_2	80 m
Coeficiente de Aerodinâmica	C_p	0,593
Velocidade Extrapolada ao Cubo	V^3	4,3 ³ m/s
Eficiência	η	0,96
Resultado	P	139.350 watts

Fonte: Autores, 2023.

Após a análise estatística apresentada, pode-se afirmar que as localidades macaenses apresentam ventos com comportamento semelhantes às médias sudestinas, tendo um fator de escala que varia de 1 a 3 e um fator de forma que apresenta disponibilidade de ventos em boa parte do ano, sem grandes impactos baseados nas sazonalidades, embora ausentes de valores expressivos que indiquem um rendimento vantajoso na exploração do recurso.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo estimar os coeficientes da função Weibull para diferentes localidades do município de Macaé, avaliando o desempenho em função da sazonalidade da velocidade, potencial e disponibilidade do recurso eólico. Para se atingir esse objetivo, estudou-se os bancos de dados de seis estações meteorológicas do município no intervalo de outono de 2021 ao verão de 2022, tratando os dados e realizando extrapolações das velocidades dos ventos e análises preditivas de potência. Além disso, para complementar o trabalho, foram apresentados gráficos que ilustram o ajuste da função Weibull em cada distribuição de frequências.

Com base nos resultados alcançados, as estações de Estrada de Morro Grande e Parque Aeroporto dispuseram de ventos moderados e com continuidade média ao longo de todo o ano, enquanto Glória e Trapiche tendem a apresentar ventos com um comportamento completamente regular, embora com baixas velocidades.

Sendo assim, infere-se que o Parque Aeroporto é um local propício a explorar a força mecânica dos ventos, sem finalidades de geração de energia elétrica; os demais bairros, por outro lado, devem orientar seus planejamentos para aplicações de dissipação de poluição, com ventos que dissipem a concentração de aerossóis, e de lazer, com ventos que possibilitem a

prática de *Windsurf* e demais esportes no mar. Ressalta-se, em adição, que Miramar e Mirante da Lagoa são bairros situados entre ambas as observações, com ventos e uma disposição eólica razoável em relação aos demais bairros, e que ainda contam com brisas continentais e de mar, atribuindo potencial para aplicações urbanas de ventilação natural e possibilidade de aplicações que vão além das mencionadas anteriormente.

Destarte, espera-se que a apuração realizada contribua com a organização pública e as futuras investigações acerca da aplicabilidade urbana dos ventos e da disponibilidade do recurso eólico no município de Macaé. Além disso, como proposta para trabalhos posteriores, sugere-se, primeiramente, que sejam realizadas pesquisas para determinar a ocorrência, a velocidade e a direção das rajadas de vento no município, a fim de se realizar um embasamento complementar para planejamento urbano.

REFERÊNCIAS

BARROS, J D *et al.* **Sazonalidade do vento na cidade de Natal/RN pela distribuição de Weibull.** Sociedade e Território, v. 25, n. 2, p. 78-92, 2023.

FERNANDES, L. P. M *et al.* **Wind Power Evaluation of 17 Stations of the Rio de Janeiro State, Brazil, a Case Study from 2020-2021.** OPEN ACCESS LIBRARY JOURNAL, v. 09, p. 1-13, 2022.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group 1 to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 2021. doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

KASSAI, J. R.; CARMONA, B. S. **A matriz energética brasileira: uma análise perante a NDC e o ODS7 (2019).** Congresso EAC/FEA/USP: Controladoria e Contabilidade, São Paulo, 2019.

LANDSAT. **Earth Science Division and ECF Information (ESDECFI).** Disponível em: <<http://www.espo.nasa.gov/project/satellite.html>>. Acesso em: 2022.

NAVIDI, W. C. **Statistics for Engineers and Scientists.** McGrawHill Education: Nova Iorque, e. 5, 2020.

NUNES, L. N.; KLÜCK; M, M.; FACHEL, J. M. G. **Uso da imputação Múltipla de Dados faltantes: uma simulação utilizando dados epidemiológicos.** Cad. Saúde Pública, v. 25, e. 2, 2009.

PEREIRA, D. S. *et al.* Análise sazonal dos ventos de superfície do estado do Rio de Janeiro com base em dados do período 2007-2015. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 8, p. 58366-58386, 2022.

SALVI, L. L.; FERREIRA, N. J. **Análise Preliminar dos Sistemas Atmosféricos Presentes em Episódios de Ventos Fortes que Causaram Impactos no Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil.** GEOGRAFIA, Rio Claro, v. 33, n. 3, p. 527-552, 2008.

SANSIGOLO, C. A. Distribuições de Probabilidade de Velocidade e Potência do Vento. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 20, p. 207-214, 2005.

SILVA, S. P *et al.* **A Importância da Biomassa na Matriz Energética Brasileira.** Pensar Acadêmico, v. 19, n. 2, p. 557-583, 2021.

SOBRAL, B.S. *et al.* Regime de Vento na Serra do Mar - Rio de Janeiro, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 3, p. 441-451, 2018.

WEIBULL, W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. **ASME Journal of Applied Mechanics**, p. 294-297, 1951

YNOUE, R. Y *et al.* **Meteorologia: noções Básicas.** Oficina de Textos: São Paulo, e. 1, 2017.

Como Referenciar este Artigo, conforme ABNT:

NASRI, A. L. X. G; SANTOS, H. S; GNAPP, P. S. G; PAIVA, R. B; FELIX, G. R. B. Estimação dos Coeficientes da Função Weibull para Análise dos Parâmetros Eólicos: Um Estudo de Caso em Macaé, RJ. **Rev. FSA**, Teresina, v. 21, n. 1, art. 9, p. 150-168, jan. 2024.

Contribuição dos Autores	A. L. X. G. Nasri	H. S. Santos	P. S. G. Gnapp	R. B. Paiva	G. R. B. Felix
1) concepção e planejamento.		X			
2) análise e interpretação dos dados.	X	X	X	X	X
3) elaboração do rascunho ou na revisão crítica do conteúdo.	X	X			
4) participação na aprovação da versão final do manuscrito.	X	X	X	X	X