

CATEGORIA 6

Miscelâneas



Introducing Grid Forming Control Strategies in Inverter-Based Resources (IBRs) in Power Grids

Authors [Edmar Arantes¹, Guilherme Vince¹, Pedro Nunes¹, Shivani Sharma¹, Thassio Matias¹]

¹Hitachi

edmar.arantes-moreira@hitachienergy.com, guilherme.vince@hitachienergy.com,
pedro.nunes@hitachienergy.com, shivani.sharma@hitachienergy.com,
thassio.matias@hitachienergy.com

ABSTRACT

This study presents a case analysis on the replacement of grid-following (GFL) control strategies with grid-forming (GFM) control in the Brazilian electrical power system. The investigation compares the dynamic performance of GFM and GFL control approaches applied to a photovoltaic (PV) power plant integrated into a benchmark network modeled in PSCAD. The analysis focuses on system behavior under disturbance conditions. Two scenarios are evaluated: one comprising 200 MW of GFL-based generation, and another combining 100 MW of GFL and 100 MW of GFM generation. In both cases, the generation units are connected to a 380 kV transmission network subjected to frequency and voltage disturbances. The results indicate that GFL systems tend to lose synchronism and stability during such events, whereas GFM systems actively support system stability. These findings underscore the critical role of grid-forming technologies in enhancing the resilience and reliability of Brazil's renewable energy infrastructure.

Keywords:

[Grid Forming, Grid Following, Inverter-Based Resources, Power System Stability]

1. INTRODUCTION

In recent decades, many countries have sought to reduce their dependence on fossil fuels by integrating renewable energy sources into their power grids (Du *et al.*, 2019). In Brazil, this transition is marked by a growing share of wind and photovoltaic energy in electricity generation. In 2019, wind energy accounted for 9.12% of the national electricity matrix; today, it represents 14.37% (Unruh *et al.*, 2020). This shift introduces operational challenges for the electrical system, particularly due to the reduction in system inertia.

Unlike synchronous machines, wind and photovoltaic power plants do not have large rotating masses that contribute to system inertia. Instead, they rely on power electronics technologies—such as inverters and converters—for energy conversion and grid interaction (Unruh *et al.*, 2020) (Klaes e Fortmann, 2024).

The decreasing presence of synchronous generators, driven by the connection of new renewable sources, presents significant challenges to stable power system operation (Littler e Meegahapola, 2015). In this evolving scenario with greater renewable penetration, it becomes essential that newly connected generators contribute meaningfully to electrical system stability.

Current renewable energy installations predominantly employ Grid-Following (GFL) control, which represents the most widely applied control method in electrical systems today (Ahmed *et al.*, 2020). This control approach depends on synchronization with the system through Phase-Locked Loop (PLL) technology to obtain angular reference signals. However, this dependency makes GFL control particularly susceptible to system disturbances that can cause the PLL to lose its reference, resulting in stability issues and ultimately in generation shutdown, precisely when grid support is most needed. (Ahmed *et al.*, 2020). To address the inherent limitations of the GFL control, the grid-forming (GFM) control has been developed, where the generator is now able to generate its own angular reference by emulating a synchronous machine behavior through its control logic.

To enhance operational flexibility in networks with a high penetration of inverter-based resources or in weak grids, the electrical sector can benefit from the implementation of grid-forming (GFM) generators. Power plants employing GFM control have gained prominence for their significant contributions to voltage stability and improved responsiveness to grid disturbances-key characteristics for the safe and efficient operation of modern electrical systems (Unruh *et al.*, 2020).

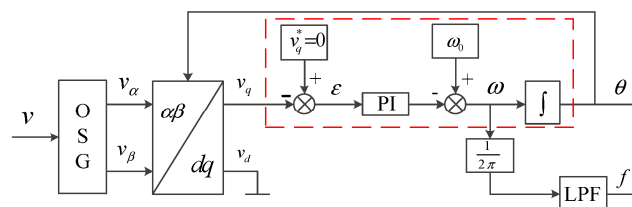
The fundamental differences between GFM and GFL control philosophies critically influence their behavior under varying grid conditions. While both technologies manage energy injections into the grid, their distinct operational characteristics determine their effectiveness in supporting modern power system requirements, particularly during challenging operating conditions that are becoming increasingly common as renewable penetration grows.

2. CONTROL TECHNOLOGY FUNDAMENTALS

2.1 Grid Following (GFL) Control Characteristics

Grid-Following inverters operate by synchronizing with existing grid voltage rather than attempting to create or control terminal voltage independently. The system measures network voltage and frequency using Phase-Locked Loop technology and injects current aligned with the network phase to deliver the desired power output. This approach makes the grid voltage serve as the fundamental reference, with the inverter generating current setpoints based on power commands to control active and reactive power injection (P and Q) injection in the grid.

Figure 1: The structure of a single-phase phase-locked loop (PLL)



Source: (Du *et al.*, 2019)

The inverter's internal current controller continuously adjusts output current to meet these setpoints, making GFL systems highly effective in strong grid environments where stable voltage and frequency references are readily available. However, this dependency on external network conditions for voltage and frequency references requires the presence of a strong and stable network infrastructure. This characteristic makes

GFL inverters particularly suitable for robust grids where network conditions are well-established and maintained but create vulnerabilities in weaker grid conditions or during system disturbances (Unruh *et al.*, 2020).

2.2 Grid Forming (GFM) Control Characteristics

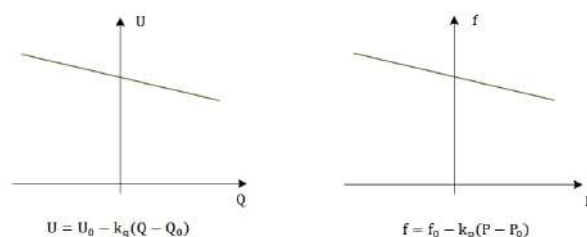
A grid-forming (GFM) inverter operates as a voltage source, generating and maintaining its own voltage waveform at the inverter terminals rather than synchronizing with the grid. Its behavior emulates that of a synchronous machine, functioning as a voltage source behind an impedance. The inverter actively regulates both voltage magnitude and frequency (or phase angle) based on predefined setpoints. By controlling these parameters, it enables precise management of active (P) and reactive (Q) power. This capability allows GFM inverters to operate effectively in weak grids, support islanded operation, and perform black start (cold start) procedures (Cakiroglu *et al.*, 2024).

Instead of using a PLL, the inverter determines its internal frequency and phase angle based on control characteristics, the main methods in the GFM controls are presented in a simplified way in the next items. It is worth mentioning that there is more than one way to implement the control of GFM from the methods to be presented.

2.2.1 Droop based

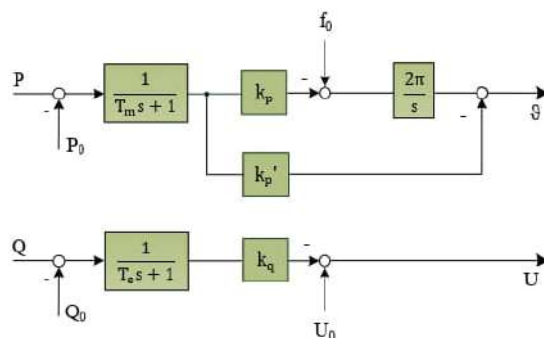
Droop-Based Control represents the most straightforward GFM implementation, where active and reactive powers measured at the converter terminal determine reference voltage and angle calculations used in internal control loops. This method provides reliable operation with proven stability characteristics suitable for most grid-forming applications (Unruh *et al.*, 2020).

Figure 2-1: Droop Curve Equation



Source: (Unruh *et al.*, 2020).

Figure 2-2: Droop Block Diagram



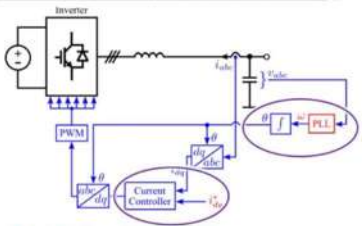
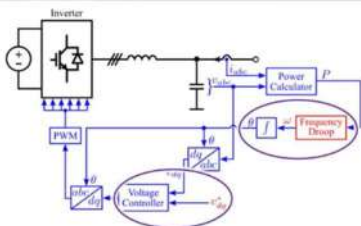
Source: (Unruh *et al.*, 2020)..

Grid-following systems require renewable energy sources to depend on pre-existing grid voltage and frequency for operation, creating significant challenges during grid disturbances or scenarios where conventional generation units are offline. Grid-forming systems inherently contribute to voltage and frequency regulation by dynamically adjusting their output to maintain system equilibrium in response to fluctuations in load and generation, maintaining this capability even under islanded conditions (Ahmed et al., 2020).

This operational autonomy proves particularly crucial for ensuring system reliability amid the variability characteristic of renewable energy sources, thereby strengthening overall grid resilience. Grid-forming control architectures significantly improve the operational stability and resilience of modern power systems while enabling more effective integration of renewable and distributed energy resources, representing a vital paradigm shift as the global energy sector transitions toward more decentralized and renewable-centric infrastructures (Klaes e Fortmann, 2024).

The synthesis is the main difference between these control modes. The Table 2-1 shows a comparison between GFL and GFM control methods.

Table 2-1: Comparative Summary of GFM and GFL Control Modes

Parameters	GFL	GFM
'Basic Diagram		
Basic Control Objectives	Provides a specific amount of energy to an energized grid	Configures the voltage and frequency of the grid
Controlled Output	Magnitude and angle of AC current	Magnitude and angle of AC voltage
Need for robust and stable terminal voltage	Yes	No
Phase-Locked Loop (PLL) Elements Present	Must have a PLL (Phase-Locked Loop)	Must not have a PLL
Flexibility (Converter Type)	Current-sourced converter (CSC)	Voltage-sourced converter (VSC)
Subtransient Response	Prioritizes current to meet fixed P/Q control	Prioritizes current to meet fixed V/f control
Transient Response	Prioritizes P/Q control	Prioritizes V/f control
Behavior facing disturbance	Tends to disconnect from grid	Maintain connection during faults
Grid condition required	Strong grid conditions	Can operate with weak grid condition
Steady-State Response	Can follow the same characteristics of sag for controlled V/f response	

Sources: Adapted from (Junior, 2024) (Green, 2021)

3. STUDY METHODOLOGY

The comparative analysis was conducted using PSCAD (Manitoba Hydro International Ltd. , 2025) simulation software where two scenarios are evaluated: one comprising 200 MW of GFL-based generation, and another combining 100 MW of GFL and 100 MW of GFM generation. In both cases, the generation units are connected to a 380 kV transmission network. These scenarios try to represent the Brazilian grid conditions with high penetration of wind and photovoltaic power plants.

The grid-forming control implementation utilized Virtual Synchronous Machine (VSM) control strategy, selected for its proven stability characteristics. This choice reflects the best practices for grid-forming implementations in transmission-connected renewable installations.

The network model incorporates realistic transmission system characteristics, including appropriate impedance values representative of Brazilian grid infrastructure. This configuration enables accurate assessment of control system performance under conditions like those encountered in actual renewable energy installations throughout Brazil.

In a 380 kV network a solar park was connected at “Bus 6” and the scenarios below were investigated:

1. Power Generator with GFL controls
2. Power Generator with GFL controls and Power Generator with GFM

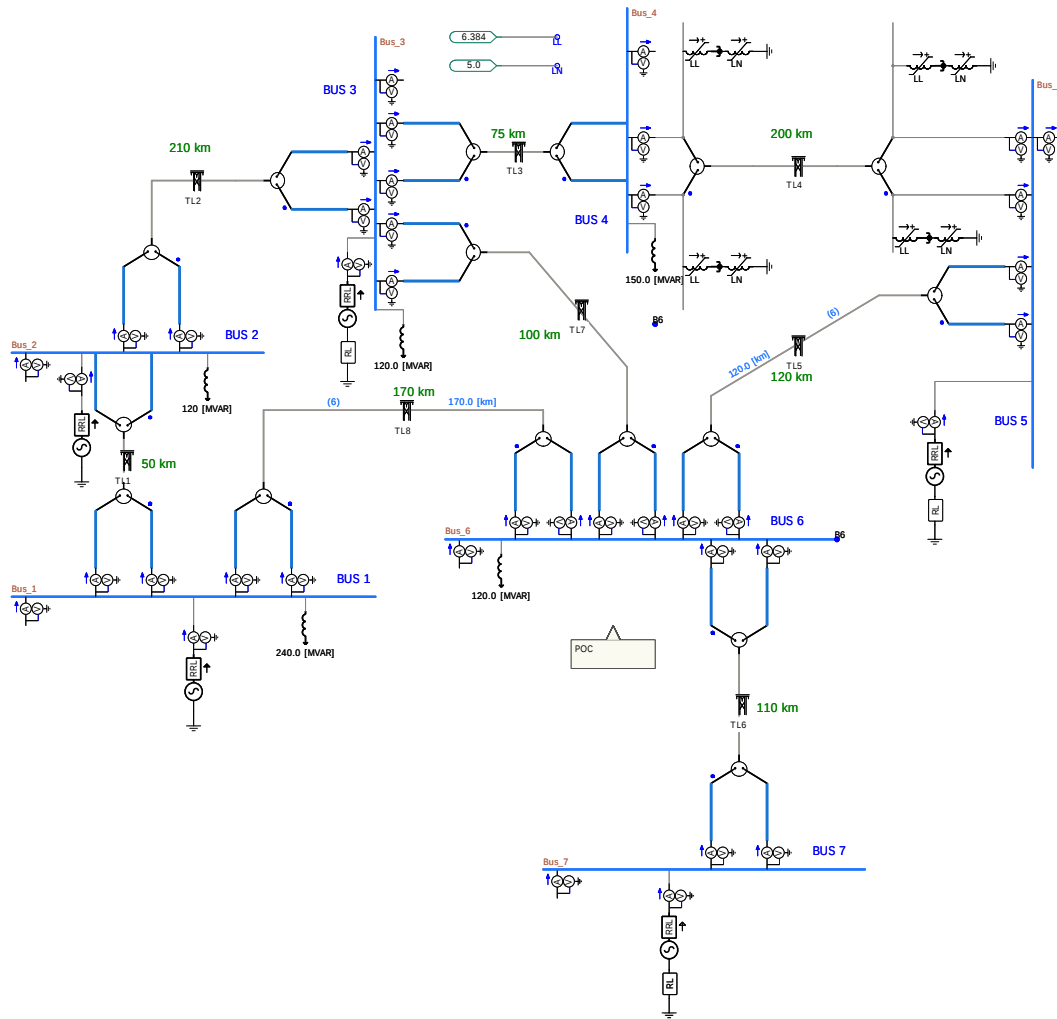
3.1 Disturbance Testing Protocol

The simulation evaluated system response to a critical disturbance event consisting of frequency drop followed by voltage drop, representing realistic grid conditions that can occur during transmission system contingencies or major load variations. This disturbance type was selected based on its relevance to recent Brazilian grid events, including the significant August 2023 incident where transmission constraints between the Northeast renewable generation region and Southeast load center created challenging operating conditions (ONS, 2023).

The disturbance sequence simulates conditions where system frequency begins to decline due to generation-load imbalance, followed by voltage reduction as reactive power requirements exceed available supply. To perform it a step response is followed by the opening of the transmission lines between busbar 6 e busbar 1. This scenario directly tests the fundamental differences between GFL and GFM control responses, highlighting their response under system disturbances capabilities to maintain grid stability during challenging conditions.

The testing protocol measures voltage levels, active and reactive power output, and frequency response at the point of connection for both generation technologies throughout the disturbance period.

Figure 3-1: Network utilized in simulations



Source: Author/ (Manitoba Hydro International Ltd. , 2025)

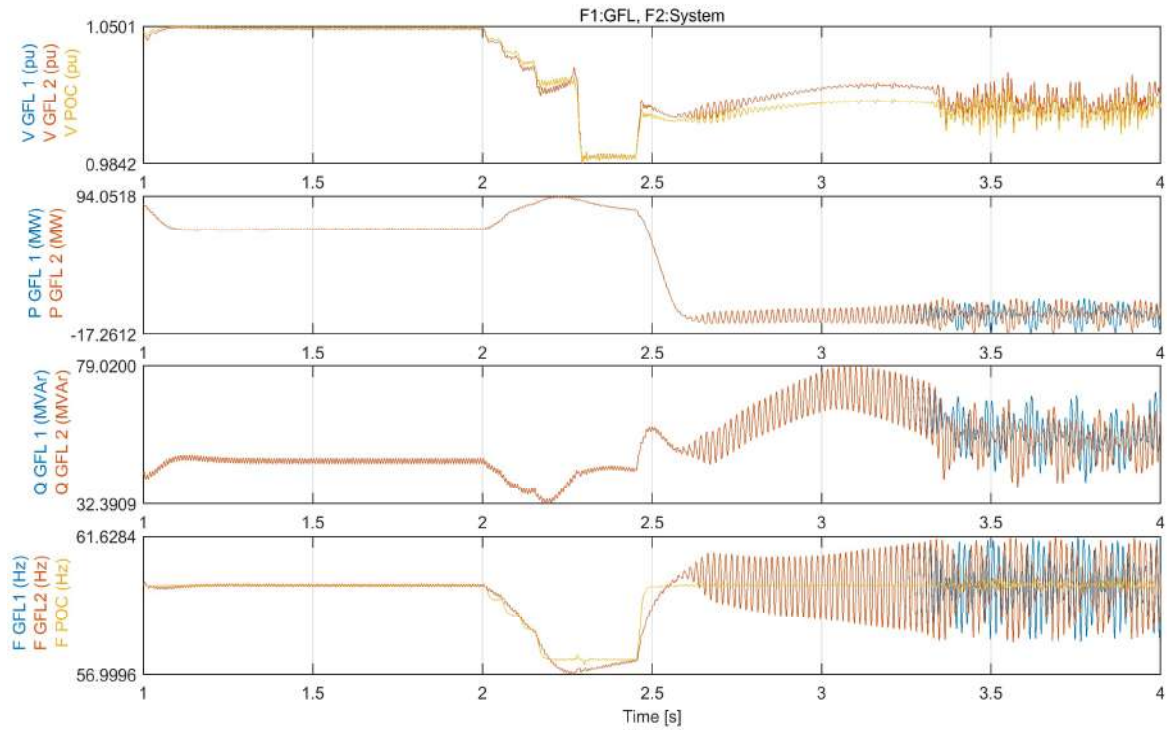
4. RESULTS AND PERFORMANCE ANALYSIS

The results reveal fundamental differences in how grid-following and grid-forming technologies respond to system disturbances. During the frequency and voltage drop event, the GFL system demonstrated characteristic vulnerability to PLL stability. This behavior represents the primary limitation of current-controlled inverter systems when facing grid disturbances that exceed PLL tracking capabilities.

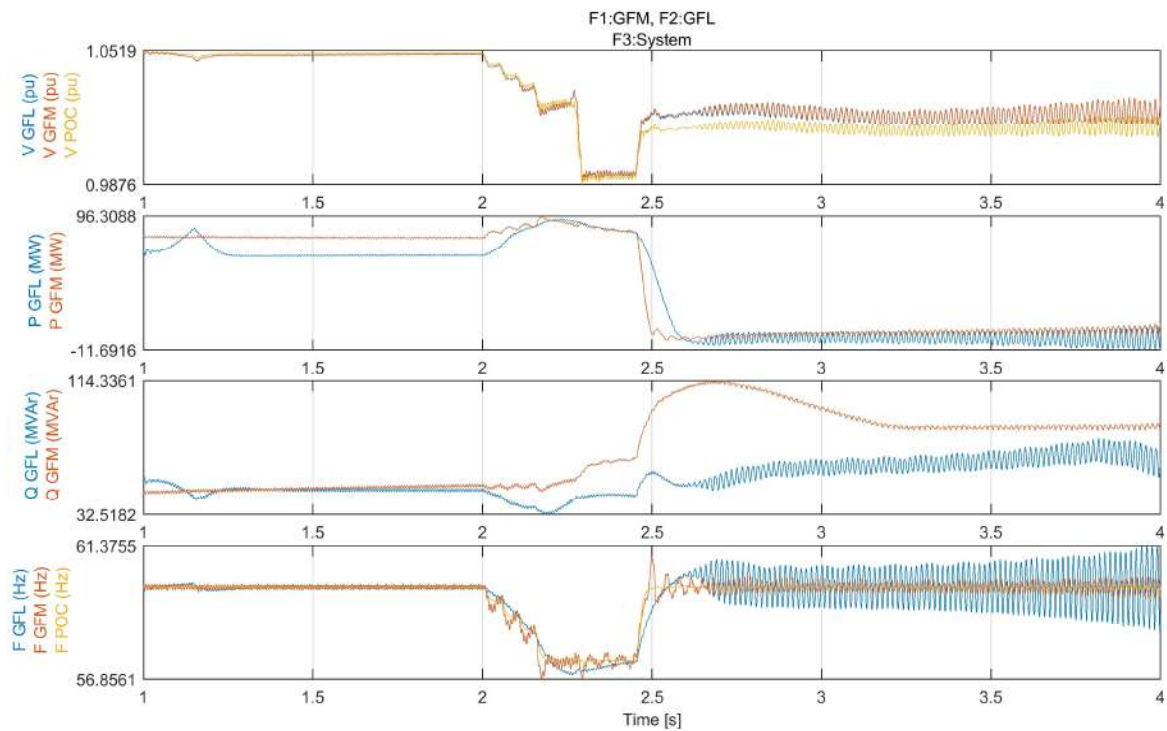
In contrast, the GFM system maintains stability throughout the disturbance period, despite experiencing oscillations due to the system disturbance. The grid-forming unit proved to be more efficient to provide reactive power support during the event, demonstrating the fundamental advantage of voltage-controlled operation during challenging grid conditions. In the test event, neither GFL nor GFM lost their connection, but the GFL lost its PLL stability and capability to provide ancillary service when system needed it the most. The ability to maintain connection and continue contributing to system stability during disturbances represents a critical operational advantage for high renewable penetration scenarios (Du *et al.*, 2019) (Tayyebi *et al.*, 2020).

Figure 4-1: Results of Frequency drop followed by voltage drop in the system – Voltage; Active and Reactive Power; Frequency

a) Scenario comprising by 200 MW GFL-based generation b) Scenario combining 100 MW of GFL and 100 MW of GFM generation



(a)



(b)

Source: Author

4.1 Voltage and Reactive Power Performance

Voltage performance analysis revealed significant differences in reactive power support capability between the two technologies. The grid-following system demonstrated limited reactive power response during voltage disturbances, with performance constrained by PLL stability requirements and current control limitations. As voltage conditions deteriorated, the GFL system became increasingly unable to provide meaningful reactive power support, the loss of stability could disconnect the generation unit due violation to protection limits (Cakiroglu *et al.*, 2024).

The grid-forming system maintained reactive power capability throughout the voltage disturbance, actively contributing to voltage support even under challenging conditions. The voltage-controlled nature of GFM operation enabled continued reactive power provision based on system needs rather than external reference requirements. This capability proves essential for voltage stability in renewable-rich power systems where conventional reactive power sources may be limited (Ahmed *et al.*, 2020).

4.2 Frequency Response Characteristics

The frequency response analysis demonstrates markedly different behaviors between the two control technologies. The grid-following system showed typical PLL-dependent response characteristics, with performance deteriorating as system frequency deviated from nominal values. The oscillatory response, could generate a cascaded effect and have other GLF based generation to disconnect, eliminating any potential contribution to frequency recovery (Cakiroglu *et al.*, 2024).

The grid-forming system exhibited robust frequency response throughout the disturbance period, maintaining stable operation and continuing to contribute to system frequency support. The VSM control implementation provided synthetic inertial response that helped stabilize frequency excursions, demonstrating the value of grid-forming technology for maintaining system stability during frequency disturbances. This capability becomes increasingly important as system inertia continues to decline with higher renewable penetration (Littler e Meegahapola, 2015).

5. IMPLICATIONS FOR BRAZILIAN RENEWABLE ENERGY DEVELOPMENT

5.1 Operational Benefits and Grid Integration

The demonstrated performance differences between GFL and GFM technologies have significant implications for Brazilian renewable energy development. The ability of GFM systems to maintain operation during grid disturbances directly addresses critical challenges identified in recent Brazilian grid events, where renewable generation disconnection during system stress contributed to operational difficulties.

Grid-forming technology enables renewable installations to function more like conventional generation during grid disturbances, providing continuous system support rather than becoming additional burdens on grid operators. This capability proves particularly valuable in regions with high renewable penetration where traditional system services may be limited, such as Brazil's Northeast region with its concentration of wind and solar generation. Using GFM in renewable energy power plants can reduce cascading failure risk by maintaining generation availability during critical system events (Cakiroglu *et al.*, 2024).

The voltage support capability demonstrated by GFM systems addresses specific challenges identified in Brazilian grid operations, where renewable sources have sometimes been unable to provide adequate reactive power support during voltage excursions. Grid-forming technology enables renewable installations to contribute actively to voltage stability, potentially reducing transmission infrastructure requirements and improving system reliability (Du *et al.*, 2019).

5.2 Strategic Implementation Considerations

The transition to grid-forming technology can be implemented strategically, beginning with critical grid connection points and installations where stability benefits are most pronounced. Mixed operations with both GFL and GFM technologies can provide immediate benefits while allowing operators to develop experience with advanced control systems before broader implementation.

For new renewable installations, particularly large-scale projects connecting to transmission systems, grid-forming capability should be considered as standard technology rather than optional enhancement. The demonstrated ability to provide essential grid services justifies the additional implementation costs through improved system reliability and reduced integration challenges.

Existing renewable installations may benefit from retrofit evaluation, particularly those located at critical grid connection points or in regions with known stability challenges. The transition to GFM technology can align with normal equipment replacement cycles, minimizing implementation costs while providing substantial operational benefits.

5.3 Regulatory and Market Evolution

The demonstrated benefits of grid-forming technology support evolution of Brazilian grid codes to recognize and potentially require GFM capabilities for large renewable installations. Enhanced grid services provided by GFM systems warrant consideration in capacity and ancillary service markets, creating appropriate economic incentives for technology adoption while recognizing the value provided to system operators (Tayyebi *et al.*, 2020).

International experience suggests that early adopters of advanced grid integration technologies gain competitive advantages in evolving energy markets. Brazilian renewable energy developers implementing GFM technology position themselves advantageously for future regulatory requirements while demonstrating technical leadership in grid integration capabilities.

The ability of GFM technology to address specific challenges identified in Brazilian grid operations, such as the August 2023 transmission event (ONS, 2023), provides compelling evidence for regulatory consideration of enhanced grid connection requirements. Grid-forming capability could become a standard requirement for renewable installations above certain capacity thresholds or in specific grid locations where stability benefits are most critical.

6. CONCLUSION

This study provides clear evidence of the superior performance characteristics of grid-forming control technology compared to conventional grid-following approaches under challenging grid conditions. The

demonstrated ability of GFM systems to provide system support and avoid loss of stability during system disturbances represents a fundamental advancement in renewable energy grid integration technology.

The contrast between GFL behavior during the event and GFM maintaining stability during the simulated disturbance highlights the critical importance of control technology selection for renewable installations. As Brazilian renewable energy penetration continues to increase, the system benefits provided by grid-forming technology become increasingly valuable for maintaining overall grid stability and reliability.

The results support immediate consideration of grid-forming technology for new renewable energy projects, particularly those connecting to transmission systems or located in regions with known grid stability challenges.

The transition to grid-forming technology should be implemented systematically, beginning with strategic installations where benefits are most pronounced and gradually expanding as operational experience develops. Mixed GFL and GFM configurations can provide immediate benefits while supporting industry learning and technology refinement. Brazilian renewable energy stakeholders should engage actively with technology providers to understand grid-forming implementation options and requirements. Early adoption of GFM technology provides competitive advantages while supporting the broader industry transition toward more resilient and capable renewable energy integration.

Continued research should focus on optimizing grid-forming control implementations for specific Brazilian grid conditions and operational requirements. Investigation of different GFM control strategies and their performance under various disturbance conditions will support technology refinement and application guidelines development.

Integration studies examining the interaction between multiple grid-forming installations and their collective impact on system stability will provide valuable insights for large-scale deployment planning. Understanding of protection system coordination requirements and optimal GFM unit distribution will support effective implementation strategies.

Economic analysis of grid-forming technology benefits, including reduced transmission infrastructure requirements and improved capacity factors, will support business case development for broader technology adoption. Quantification of system-wide benefits will facilitate appropriate market mechanism development and regulatory recognition of GFM capabilities.

The demonstrated performance advantages of grid-forming technology establish a compelling foundation for accelerated adoption across Brazil's renewable energy sector. As the country continues its leadership in renewable energy development, grid-forming technology provides essential capabilities for maintaining system stability while achieving ambitious clean energy objectives.

7. REFERENCES

- Ahmed, Shakir D. *et al.* Grid Integration Challenges of Wind Energy: A Review. *IEEE Access*, 2020. 10857-10878.
- Cakiroglu, Alper *et al.* A Comparative Analysis of Grid Forming and Grid Following Control Methodologies for Power Inverters Under Fault Ride Through Events. 024 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), Torino, 2024. 1-6.
- Du, Heng *et al.* An Adaptive Frequency Phase-Locked Loop Based on a Third Order Generalized Integrator. *Energies*, 12, 2019. 309.
- Green, Tim. "Is "Grid Forming" enough? 2021. Londres, 2021.
- Junior, Alberto Bianchi. Notas Laboratório de Sistemas de Potência/Escola Politécnica/USP. 2024. São Paulo, 2024.
- Klaes, Norbert R.; Fortmann, Jens. Immunity of Grid-Forming Control Without Energy Storage to Transient Changes of Grid Frequency and Phase. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 6, 2024. 265-276.
- Littler, Tim; Meegahapola, L.G. Characterisation of large disturbance rotor angle and voltage stability in interconnected power networks with distributed wind generation. *Renewable Power Generation*, 9 (3), 2015. 272-283.
- MANITOBA HYDRO INTERNATIONAL LTD.. 2025., 2025. Disponível em: <<https://www.pscad.com/>>.
- ONS. ANÁLISE DA PERTURBAÇÃO DO DIA 15/08/2023 ÀS 08H30MIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE DE PERTURBAÇÃO - RAP. Operador Nacional do Sistema. [S.l.]. 2023.
- Tayyebi, Ali *et al.* Frequency Stability of Synchronous Machines and Grid-Forming Power Converters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8, 2020. 1004-1018.
- Unruh, Peter *et al.* Overview on Grid-Forming Inverter Control Methods. *Energies*, 12(10), 2020. 2589.

ARQUEOLOGIA PREVENTIVA EM PROJETOS DE ENERGIA EÓLICA: ESTRATÉGIAS METODOLÓGICAS, DIRETRIZES TÉCNICAS E SEGURANÇA JURÍDICA NO LICENCIAMENTO AMBIENTAL

Almir do Carmo Bezerra¹, Marina Souza Barboza².

ANX Arqueologia

almir.bezerra@anxarqueologia.com.br, marina.souza@anxarqueologia.com.br

RESUMO

O presente artigo discute as estratégias e metodologias inovadoras adotadas frente à identificação de sítios arqueológicos durante a construção de parques eólicos. A partir da análise de casos reais no estado da Paraíba, propõe-se uma abordagem integrada entre arqueologia preventiva, planejamento de engenharia e licenciamento ambiental, que garanta a proteção do patrimônio arqueológico e a segurança jurídica ao empreendedor. A pesquisa destaca metodologias como o uso de modelos preditivos, tecnologias de mapeamento remoto e medidas físicas de contenção. Conclui-se pela necessidade de diretrizes mais claras e articulação eficiente entre órgãos licenciadores e consultorias especializadas.

Palavras-chave: Arqueologia Preventiva; Parques Eólicos; Sítios Arqueológicos; Licenciamento Ambiental; Planejamento Estratégico.

ABSTRACT

This article discusses the innovative strategies and methodologies adopted in response to the identification of archaeological sites during the construction of wind farms. Based on the analysis of real case studies, it proposes an integrated approach involving preventive archaeology, engineering planning, and environmental licensing to ensure the protection of archaeological heritage and legal security for developers. The research highlights methodologies such as the use of predictive models, remote mapping technologies, and physical containment measures. It concludes with the need for clearer guidelines and more effective coordination between licensing agencies and specialized consultancies.

Keywords: Preventive Archaeology; Wind Farms; Archaeological Sites; Environmental Licensing;

¹ Arqueólogo e diretor presidente da ANX Arqueologia.

² Arqueóloga e coordenadora de projetos da ANX Arqueologia.

Strategic Planning.

1. INTRODUÇÃO

A Serra da Borborema é tradicionalmente conhecida pelos inúmeros sítios arqueológicos descobertos, sobretudo pela arqueologia preventiva, durante o processo de licenciamento de grandes empreendimentos. As pesquisas desenvolvidas no estado da Paraíba reiteram o alto potencial arqueológico regional, impondo a adoção de novos paradigmas para sua preservação, em compasso com o desenvolvimento econômico nacional. Muito comum encontrar relatos de registros rupestres dispersos pelos afloramentos graníticos que compõem sua paisagem.

Foi nesse contexto onde quatro sítios arqueológicos com arte rupestre foram identificados durante o monitoramento na área diretamente afetada pelas obras de construção de um complexo eólico no município de Pocinhos/PB. Vale destacar que sítios arqueológicos são bens protegidos no âmbito federal pela constituição da República no seu Art. 216. Ademais, a pesquisa arqueológica no Brasil tem sido orientada por um arcabouço teórico e legislativo (Portaria SPHAN nº 07/1988; Lei Federal 3.924/1961; Instrução Normativa IPHAN 001/2015) que em conjunto, normatizam a atividade de pesquisa arqueológica e asseguram a necessidade de estudos antecedendo a implantação de grandes empreendimentos, bem como a conciliação das fases de obtenção de licenças ambientais com as da pesquisa arqueológica. Porém, em alguns casos específicos busca-se ações mitigatórias alternativas visando a proteção de sítios arqueológicos que estão sob o risco de desaparecerem.

Por sua vez, ocorreriam escavações com o uso de explosivos no processo de regularização do terreno. As intervenções em questão são necessárias para execução das fundações dos aerogeradores, das plataformas de montagem, das vias de acesso internas e das valas da rede de média tensão subterrânea. Entretanto, por se tratar de ocorrências arqueológicas onde não é possível o seu resgate, o desmonte das rochas poderiam impactar sobremaneira os sítios que estavam localizados exatamente na praça dos aerogeradores.

Tendo em vista a insuficiência das referências normativas nacionais que indiquem os procedimentos específicos para mitigar os efeitos de tais operações em áreas com ocorrência de bens de natureza arqueológica, os subsídios para esta inusitada situação consistiram em pesquisas indiretas em livros, artigos, vistoria em campo, reuniões com o IPHAN, equipe de engenharia e demais publicações técnicas que versam sobre a temática, resultando em alternativas diversas que poderão ser aplicadas em outros projetos pelo país.

2. OBJETIVOS DA PESQUISA

O presente artigo tem como objetivo geral apresentar e analisar as estratégias adotadas para a proteção do patrimônio arqueológico diante do aparecimento de sítios durante a fase de implantação de parques eólicos, com foco na compatibilização entre a preservação cultural e a continuidade das obras de infraestrutura. Busca-se demonstrar, a partir de uma experiência concreta, como o planejamento integrado, o uso de ferramentas operacionais simples e eficazes, e a articulação entre equipes técnicas, empreendedores e órgãos de controle podem garantir resultados positivos mesmo diante da ausência de normativas específicas para contextos emergenciais. Pretende-se, ainda, contribuir com subsídios para o aprimoramento das políticas públicas de licenciamento ambiental e arqueológico, reforçando a importância da previsibilidade, da padronização de condutas e da valorização do patrimônio cultural no contexto da expansão das energias renováveis no Brasil.

Em casos pontuais, a ausência de protocolos operacionais específicos pode gerar dúvidas sobre os procedimentos a serem adotados e aumentar a pressão por decisões rápidas por parte das consultorias e do IPHAN. Nesse contexto, o diálogo entre os órgãos responsáveis, as equipes técnicas e os empreendedores é essencial para garantir soluções viáveis, que conciliem a continuidade do empreendimento com o respeito à legislação patrimonial e à preservação dos bens arqueológicos.

3. CONTEXTO ARQUEOLÓGICO DA SERRA DA BORBOREMA NA PARAÍBA

A mesorregião da Borborema paraibana, onde foram identificados os sítios arqueológicos e construído o complexo eólico, continha povos indígenas majoritários, como os Cariris, que eram formados pelos grupos Carnoiós (Curinaíós), no extremo sul, ocupando toda a área e seu entorno da rede hidrográfica do rio Paraíba; os Bodopitás ou Fagundes, no extremo leste da microrregião do Cariri Oriental; os Tarairiús, que incluíam os Xucurús, distribuídos por toda microrregião do Cariri Ocidental; e os Janduís, que ocupavam a área da microrregião do Seridó Oriental (Borges, 1993).

Durante as atividades de monitoramento arqueológico, foram identificados quatro sítios arqueológicos de significativa relevância cultural. Caracterizados por elementos de arte rupestre com pinturas em tonalidade vermelha (figuras 1 e 2), distribuídas sobre painéis localizados em afloramentos rochosos de difícil acesso. Essa característica geográfica contribuiu para a conservação dos vestígios e permitiu a adoção de medidas preventivas, evitando impactos diretos provenientes das obras. A identificação foi seguida de ações de registro no Cadastro Nacional de Sítios Arqueológicos (CNSA) e de definição de estratégias de proteção física e simbólica imediatas.

Os sítios possuem características semelhantes compostas por grafismos puros, de coloração avermelhada próximo ao chão, com apenas uma mancha gráfica, sendo identificada como Tradição Agreste. Nas pesquisas da célebre arqueóloga Gabriela Martin (1996), os grafismos puros nas pinturas

rupestres são definidos como elementos gráficos abstratos que não representam figuras humanas, animais ou cenas narrativas, mas sim formas geométricas e simbólicas cuja interpretação não está diretamente associada à figuração do mundo natural. Esses grafismos incluem linhas paralelas, ziguezagues, pontos, círculos concêntricos, formas quadriculadas, entre outros padrões visuais.

Figuras 1 e 2. Pinturas rupestres identificadas durante o monitoramento arqueológico.



Fonte: ANX Arqueologia, 2024.

Segundo Martin, os grafismos puros são característicos de algumas tradições rupestres do Nordeste brasileiro, como a Tradição Agreste, e estão relacionados a sistemas simbólicos e modos de expressão visual de grupos pré-coloniais. Ela ressalta que, embora não sejam figurativos, esses grafismos possuem forte carga simbólica e podem refletir aspectos cosmológicos, territoriais ou rituais das sociedades que os produziram. Assim, longe de serem "simples decorações", os grafismos puros são entendidos como manifestações culturais complexas, cuja decifração exige sensibilidade arqueológica, contextualização espacial e comparação entre sítios e tradições rupestres.

As representações gráficas identificadas nessa região da Paraíba, embora apresentem relativa homogeneidade formal, revelam uma importante sobreposição de elementos associados às tradições Nordeste e Agreste. Segundo Adriana Oliveira (2024), essa coexistência, em um espaço geograficamente restrito, indica que a região pode ter funcionado como uma fronteira estilística, caracterizada pelo intercâmbio e pela apropriação de padrões gráficos distintos. Destacam-se antropomorfos com variações formais e de disposição espacial, vinculados tanto às subtradições Várzea Grande e Seridó, da tradição Nordeste, quanto à tradição Agreste. Além disso, observa-se a presença de registros sem correlação tipológica definida, o que reforça a hipótese de hibridismo cultural. A distribuição espacial das pinturas evidencia escolhas deliberadas de locais, com concentração de sítios em pontos estratégicos da paisagem, revelando critérios de seleção que articulam símbolos, território e memória social.

Nesse contexto, a preservação in situ foi possível mediante a delimitação da área e controle rigoroso de circulação, evidenciando a importância da gestão preventiva integrada ao planejamento

construtivo. Tais medidas garantiram a integridade dos sítios e reforçaram a compatibilidade entre desenvolvimento energético e proteção do patrimônio arqueológico.

A experiência adquirida demonstra a viabilidade de conciliar grandes projetos de infraestrutura com a salvaguarda do patrimônio cultural. A adoção de medidas pautadas na legislação arqueológica brasileira, especialmente a Instrução Normativa IPHAN nº 001/2015 e a Lei nº 3.924/1961, aliada ao diálogo entre arqueólogos, empreendedores e comunidades locais, contribui para mitigar riscos e valorizar a herança cultural. No contexto da energia eólica, essa abordagem representa não apenas uma exigência legal, mas uma oportunidade de integrar sustentabilidade cultural aos avanços tecnológicos do setor.

4. PANORAMA GERAL, ESTRATÉGIAS DE REALOCAÇÃO E PROTEÇÃO FÍSICA DURANTE A IMPLANTAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS EM ÁREAS DE ALTO POTENCIAL ARQUEOLÓGICO.

Seguindo as diferentes fases da pesquisa arqueológica voltada para o licenciamento de projetos de alto impacto nas condições do solo, necessário se faz um trabalho preventivo composto por levantamento de dados secundários, pesquisa de campo com caminhamento em toda ADA e sondagens manuais nas áreas dos aerogeradores e acessos internos, justamente buscando fornecer alternativas locais para o empreendedor. Muito embora, as dificuldades naturais por vezes impedem que áreas ocupadas pelos grupos humanos no passado remoto sejam encontradas facilmente no presente. Por isso, durante a etapa de avaliação de impacto a equipe de arqueologia identificou apenas 1 sítio nas proximidades do aerogerador, mas na fase seguinte, ao longo do monitoramento das obras, a equipe registrou a presença de 5 sítios arqueológicos nas proximidades das plataformas.

Como já destacado, os monumentos arqueológicos, definidos nos termos da legislação, são considerados bens da União, conforme a Constituição Federal. Por isto, os sítios identificados, bem como os demais localizados na área de influência do empreendimento incluem-se no rol de monumentos tipificados no art. 2º alínea *d* da Lei Federal n.º 3.924/1961, que trata da proteção ao patrimônio arqueológico, como é o caso das inscrições rupestres.

Oportunamente, reitera-se que de acordo com o art. 3º dessa lei, são proibidos em todo o território nacional, o aproveitamento econômico, a destruição ou mutilação, para qualquer fim dos sítios e inscrições rupestres ou locais como sulcos de polimentos de utensílios e outros vestígios de atividade de paleoameríndios. Também conforme seu art. 5º, qualquer ato que importe na destruição ou mutilação desses bens será considerado crime contra o Patrimônio Nacional e, como tal, punível de acordo com o disposto nas leis penais.

Contudo, sabe-se que a locação dos aerogeradores de um parque eólico é definida em função do recurso eólico em cada local e a interferência entre os elementos naturais e os aerogeradores e dos próprios aerogeradores entre si. Dessa forma, a locação dessas estruturas é restrita a uma região específica, não sendo possível deslocá-lo além de certo limite. De toda sorte, tendo em conta os sítios arqueológicos mapeados durante a sua implantação e as restrições supracitadas, o layout dos aerogeradores foi revisado para garantir a maior distância possível do sítio.

Dentre as premissas para realização do projeto de vias internas e plataformas há restrições físicas de transporte das carretas dos componentes e guindastes (as quais demandam rampas com inclinação limitada) e a própria orografia do terreno, por exemplo. Tendo em conta a complexidade do local de implantação do parque eólico, com afloramentos graníticos e morros acentuados, essas premissas levam a um projeto civil complexo com necessidade de terraplenagem significativa. Mesmo assim, o entorno dos sítios arqueológicos deve ser evitado e protegido ao máximo.

Logo, essa situação foi refletida no projeto básico do complexo eólico, onde previa-se basicamente a execução de aterros nas vias e plataforma mais próxima do único sítio arqueológico mapeado na fase anterior, sendo a realização de escavação muito reduzida. Adotou-se com isso, alteração do *layout*, adoção de técnicas alternativas de construção e medidas de prevenção e controle. Entretanto, com a descoberta, durante a obra, de outros quatro sítios com registros rupestres em blocos que seriam detonados por explosivos, buscou-se alternativas para mitigar os impactos que poderiam ser gerados sobre as pinturas.

Com isso, houve uma cooperação entre os profissionais envolvidos buscando soluções integradas para proteção dos sítios identificados, dentre as ações inovadoras desenvolveu-se o plano de fogo que incluiu medidas específicas para proteger os sítios arqueológicos próximos às áreas de escavação com uso de explosivos. Para isso, foi desenvolvido um estudo preditivo com base na ABNT NBR 9653/2018, que avaliou os níveis de vibração gerados pelas detonações e sua propagação em maciços rochosos do tipo ortognaisse e migmatito. As medições foram realizadas com seis estações sismográficas estrategicamente posicionadas, a fim de identificar as velocidades de vibração de pico de partícula (PPV) e suas respectivas frequências, fundamentais para evitar danos estruturais às cavidades arqueológicas.

A metodologia adotada permitiu a formulação de uma equação de atenuação sísmica específica para o local, por meio da qual se correlacionam as cargas explosivas (CME), a distância até os pontos sensíveis (como os sítios arqueológicos) e os níveis de vibração toleráveis. Com base nos dados obtidos, foram estabelecidos limites máximos de carga por espera a serem utilizados nos futuros planos de fogo, considerando distâncias mínimas de segurança e os limites normativos de vibração (15, 20 e 50 mm/s), de modo a minimizar riscos a bens arqueológicos.

Por fim, os resultados do estudo geraram um quadro normativo para a execução controlada das detonações, permitindo o planejamento das escavações com base em critérios técnicos e de segurança. Esse planejamento fornece subsídios diretos para ações de licenciamento ambiental e salvaguarda do patrimônio arqueológico, orientando a aplicação de medidas preventivas para que as vibrações geradas pelas explosões não ultrapassem os limiares aceitáveis nos sítios arqueológicos identificados na área de influência do empreendimento.

Adicionalmente às metodologias descritas acima, a equipe de arqueologia em conjunto com o IPHAN, traçou estratégias complementares que visaram a proteção desses locais. Foram adotadas medidas de contenção com implementação de uma barreira física com tapumes e manta de bidim, além de um forte esquema de informação e sinalização com placas e cerquite ao redor dos sítios arqueológicos, para evitar qualquer passagem de poeira e/ou partículas oriundas da detonação. A delimitação física por meio de cercas metálicas, reforçadas por sinalização padronizada conforme as normas de segurança e de gestão do patrimônio, evitou acessos indevidos e minimizou riscos de danos acidentais aos sítios preservados in situ.

Em todo seu entorno foram preservados os afloramentos rochosos, que fizeram parte do seu isolamento protetivo. A manta de proteção de detritos foi colocada junto ao matacão que compõe o sítio, sendo uma manta geotérmica, resistente ao calor e outras formas de intemperismos.

Logo em seguida, a barreira protetiva foi executada. Esta possuía em média 5 metros de distância do sítio, ficando direcionada de frente para a área de base do aerogerador e do acesso do parque. Foram utilizados caibros de 1,5 metros e tapumes de madeirite com 2 metros de altura para a formação da barreira. Foram fixadas a barreira protetiva e a cerca, sucessivamente. A cerca foi posicionada a 10 metros de distância do sítio, nos dando um bom perímetro de proteção e visibilidade. Nas figuras 3 e 4, observam-se os materiais utilizados para o cercamento dos sítios como os caibros de madeira, tapume de madeira e cerquite da cor laranja.

Figuras 3 e 4. Medidas protetivas empregadas nos sítios rupestres



Fonte: ANX Arqueologia, 2024.

As medidas protetivas foram renovadas e reforçadas a cada nova intervenção. Após as atividades de detonação, a equipe realizou levantamentos minuciosos do sítio, não sendo identificados impactos sobre o suporte rochoso. Portanto, os danos atingiram apenas as estruturas protetivas

Observando as figuras 5 e 6 (abaixo), ressalta-se que não ocorreram impactos diretos no suporte rochoso do sítio arqueológico, para evitar impactos decorrentes da continuidade da instalação, como movimentação de veículos e poeira, a estrutura das medidas protetivas foi mantida.

Figuras 5 e 6. Danos causados nas medidas protetivas decorrentes da atividade de desmonte de rocha.

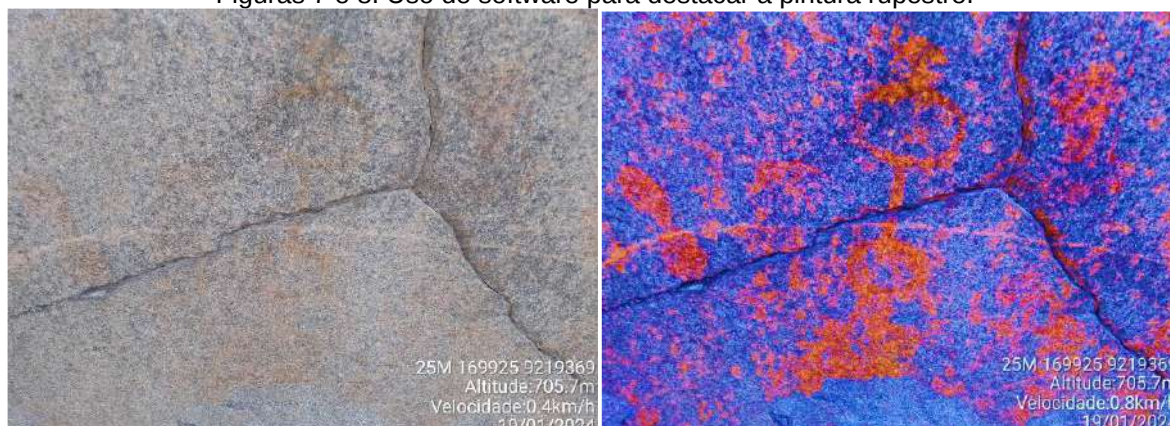


Fonte: ANX Arqueologia, 2024.

O uso de tecnologias inovadoras tem transformado o estudo da arte rupestre, oferecendo maior precisão, agilidade e segurança às pesquisas arqueológicas. Van Havre (2024) discute criticamente o uso de computadores na arqueologia brasileira em tempos de inteligência artificial. Recursos como drones, fotogrametria, modelagem 3D e SIG possibilitam detectar estruturas, realçar traços, avaliar a conservação das pinturas e integrar os registros a dados espaciais mais amplos. Softwares de tratamento de imagem permitem corrigir distorções, produzir documentação em alta resolução e organizar bancos de dados comparativos. Essas ferramentas favorecem tanto a preservação digital quanto a análise em múltiplas escalas, do detalhe gráfico ao contexto regional. Além de otimizar o trabalho de campo e laboratório, a tecnologia amplia as interpretações arqueológicas, revelando aspectos simbólicos, culturais e territoriais associados às representações rupestres, sem comprometer a integridade dos sítios, como pode ser observado nas figuras abaixo.

Ademais, os planos de contingência bem estruturados, com protocolos de parada imediata, isolamento da área e acionamento do IPHAN, são fundamentais para garantir que eventuais descobertas não paralise o empreendimento por longos períodos. A implementação de planos específicos de proteção para sítios com arte rupestre ou de difícil resgate torna-se um diferencial para as empresas que buscam licenciamento ágil e seguro.

Figuras 7 e 8. Uso de software para destacar a pintura rupestre.



Fonte: ANX Arqueologia, 2024.

Por fim, destaca-se a importância do monitoramento arqueológico contínuo, com equipes técnicas integradas ao cronograma da obra. Essa atuação in loco possibilita intervenções imediatas diante de ocorrências não previstas, garantindo maior flexibilidade na tomada de decisão e reforçando o compromisso com a salvaguarda do patrimônio arqueológico. A experiência acumulada nessas ações tem contribuído para o aperfeiçoamento de diretrizes operacionais e para o fortalecimento da articulação entre órgãos de controle, empreendedores e consultorias especializadas.

A proteção eficaz do patrimônio arqueológico em obras de infraestrutura não depende apenas do uso de tecnologias sofisticadas, mas da implementação de estratégias inovadoras e realistas, compatíveis com o ritmo e a complexidade das frentes de obra. Os arqueólogos estruturaram planos de contingência que se destacam pela capacidade de mobilização rápida, organização de fluxos de resposta e articulação direta com os tomadores de decisão (Arqueólogos/Empreendedor/IPHAN).

Portanto, a gestão eficiente de qualquer ameaça ao patrimônio arqueológico em parques eólicos exige uma coordenação estreita entre os profissionais da arqueologia, engenheiros de obra e representantes dos órgãos de controle, como o IPHAN. A realização de reuniões técnicas periódicas, o compartilhamento de mapas e informações atualizadas e o planejamento conjunto de intervenções são elementos-chave para o sucesso do projeto. Além disso, a construção de protocolos internos de resposta rápida em caso de descoberta de sítios é essencial para dar segurança ao empreendedor e evitar embargos. A confiança mútua entre as partes envolvidas deve ser reforçada por meio da transparência, da comunicação clara e do respeito aos prazos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Naturalmente, diante dos diversos fatores que concorrem para o estabelecimento das medidas de proteção dos sítios identificados no âmbito dos empreendimentos eólicos em todo o Brasil, não se espera a partir do levantamento feito neste artigo, esgotar as possibilidades de definição de limites para esses critérios técnicos de uso de explosivos nas proximidades de sítios rupestres e sim contribuir para o entendimento de qual técnica é a mais adequada para garantir a proteção ao patrimônio cultural, em

alinhamento com as diretrizes estabelecidas pela Instrução Normativa IPHAN nº 001/2015 e demais arcabouços legais.

Considera-se que há ainda uma lacuna de conhecimento geral no campo da arqueologia e, sobretudo no IPHAN, a respeito desses parâmetros de segurança para intervenções nas áreas de influência de bens acautelados. Desse modo, a partir desta publicação, entende-se que há possibilidade de serem estabelecidos parâmetros para os casos que envolvam intervenções semelhantes, a priori relacionadas com o campo do patrimônio arqueológico, podendo ser estendido as demais tipologias de bens acautelados.

Sugere-se, portanto, apenas para fins de melhor acompanhamento, que seja sempre solicitado ao empreendedor a previsão de áreas onde estão previstas as detonações e o encaminhamento dos estudos e relatórios consolidados a respeito da operação de detonação indicando o método que será utilizado com grande antecedência para avaliação do IPHAN, indicando se possível os testes preliminares eventualmente realizados in loco, os critérios definidos, sobretudo a Vibração de Partícula Pico (PPV) e o plano de fogo. Entende-se que as atividades desenvolvidas no contexto deste processo constituem-se como oportunidade para o aprofundamento dos conhecimentos técnicos das consultorias arqueológicas, o IPHAN e as empresas geradoras de energias renováveis, sobre as operações de detonação e possíveis impactos ao patrimônio arqueológico, contribuindo para o aperfeiçoamento do aprendizado geral sobre o tema.

Portanto, as medidas protetivas implementadas no âmbito do programa de gestão do patrimônio arqueológico nas obras de construção do complexo eólico revelaram-se eficazes na mitigação dos impactos decorrentes do uso de explosivos nas atividades de desmonte de rocha. A definição de uma zona de segurança, aliada ao monitoramento arqueológico pré e pós-detonação e à adoção de barreiras físicas (como mantas geotêxteis e cerquites), asseguraram a integridade dos sítios arqueológicos identificados, especialmente aqueles de registro rupestre. A metodologia empregada respeitou os parâmetros técnicos estabelecidos pela Instrução Normativa IPHAN nº 001/2015 e pelas diretrizes da Lei Federal nº 3.924/61, reforçando o compromisso com a salvaguarda do patrimônio cultural. Os resultados alcançados demonstram que, mesmo diante de intervenções de alta complexidade técnica, é possível compatibilizar o desenvolvimento de empreendimentos com a preservação do patrimônio arqueológico, desde que respeitadas as normas e adotadas medidas preventivas rigorosas e bem fundamentadas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGES, Elias. *As nações indígenas da Paraíba*. João Pessoa: [s.n.], 1993.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*. Brasília: Senado Federal, 1988.

BRASIL. *Lei nº 3.924, de 26 de julho de 1961*. Dispõe sobre os monumentos arqueológicos e pré-históricos. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 27 jul. 1961.

BRASIL. Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). *Portaria SPHAN nº 07, de 30 de março de 1988*. Dispõe sobre normas para realização de pesquisas arqueológicas. Brasília: IPHAN, 1988.

BRASIL. Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). *Instrução Normativa nº 001, de 25 de março de 2015*. Dispõe sobre os procedimentos administrativos para pesquisa, prospecção e escavação arqueológica em território nacional. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 26 mar. 2015.

MARTIN, Gabriela. *Pré-história do Nordeste do Brasil*. 1. ed. Recife: Editora Universitária UFPE, 1996.

OLIVEIRA, Adriana Machado Pimentel de. *Ambiente e representações gráficas: paisagem e pinturas rupestres no sul dos Cariris Velhos do Paraíba, PB*. 2024. Tese (Doutorado em Arqueologia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

VAN HAVRE, Grégoire. Computadores e arqueologia brasileira: uma revisão crítica em tempos de inteligência artificial. *Revista Brasileira de Arqueologia*, v. 39, n. 2, p. 32–44, 2024.

Entre ventos abundantes e desigualdades: Uma análise sobre a participação de mulheres no setor eólico *onshore* do Rio Grande do Norte

Renata Rayane Moura da Silva Rodrigues¹, Valdênia Apolinário², Julia Rocha Araujo³

1 Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Ciências Econômicas

jor.renata.moura@gmail.com, valdenia.apolinario@ufrn.br, araujorjulia@gmail.com

RESUMO

Este estudo traz à luz a discussão sobre a participação das mulheres no setor eólico *onshore* do Rio Grande do Norte, estado que lidera, junto com a Bahia, a produção de energia eólica no Brasil. A análise abrange o período de 2021 a 2024, marcado por recordes de expansão e mais visibilidade para ações empresariais pró-igualdade de gênero. Há escassez de informações com essa perspectiva na literatura. Nesse contexto, dados de grandes áreas do setor elétrico apontam uma sub-representação feminina, especialmente em ocupações técnicas e de Engenharia - que concentram as maiores remunerações, conforme a Relação Anual de Informações Sociais (RAIS), do Ministério do Trabalho e Emprego. O artigo integra um projeto de pesquisa mais amplo, que propõe aplicação de questionários e aguarda análise do Comitê de Ética e Pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Neste artigo, a discussão se concentra no que os números mostram, com base em informações públicas, e no que diz a literatura.

Palavras-chaves:

Mulheres; eólica; Rio Grande do Norte; desigualdade de gênero; trabalho

ABSTRACT

This study brings to light the discussion about the participation of women in the onshore wind energy sector in Rio Grande do Norte, a state that leads, along with Bahia, wind energy production in Brazil. The analysis covers the period from 2021 to 2024, marked by record growth in the sector and increased visibility for corporate actions promoting gender equality. There is a scarcity of information from this perspective in the literature. In this context, data from broad areas of the electric sector indicate female underrepresentation, especially in technical and engineering positions – those that concentrate the highest salaries, according to the Annual Report on Social Information, published by Brazil's Ministry of Labor and Employment. The study is part of a broader research project that proposes applying questionnaires and awaits evaluation by the Research Ethics Committee at the Federal University of Rio Grande do Norte. The discussion here

focuses on what the numbers show, based on public information, and on what the literature reveals.

Keywords:

Women; wind energy; Rio Grande do Norte, gender inequality, labor Market

1. INTRODUÇÃO

A indústria de energia eólica registrou 196 mil postos de trabalho no Brasil entre 2011 e 2020 (BORGES, 2022). Foram 10,7 empregos por Megawatt (MW) instalado na construção de parques *onshore*, e 0,6 por MW na operação e manutenção das usinas. O país é o maior mercado eólico da América Latina (GWEC, 2024). Entre 2021 e 2023, com avanços recordes, foi apontado como referência internacional na transição para energias limpas (GWEC, 2024). Em 2024, subiu da sexta para a quinta posição no Ranking de Capacidade Total Instalada *onshore*, liderado pela China (AGÊNCIA ABEEÓLICA, 2025).

O Rio Grande do Norte, que se alterna com a Bahia como maior gerador dessa energia no Brasil, detém 30,47% da capacidade instalada nacionalmente. O número corresponde a 10 Gigawatts (GW), 85% da matriz energética do estado (ANEEL, 2025). Mais de 10 mil empregos diretos e indiretos foram registrados em âmbito local, nas fases de construção civil, instalações, testes e comissionamento pré-operacional de parques eólicos, em 2024 (SEDEC, 2024). Mas não há dados desagregados por ocupação e gênero (RIO GRANDE DO NORTE, 2025), o que dificulta análises sobre como as oportunidades estão distribuídas e possíveis ações que ajudem a promover igualdade e equidade de gênero.

Saldo e estoque de mulheres empregadas na atividade no RN também não são disponibilizados por órgãos federais como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a Empresa de Pesquisa Energética e o Ministério do Trabalho e Emprego (IBGE, 2025a; EPE, 2025, BRASIL, 2025).

Este artigo investiga a participação feminina no setor eólico do RN, analisando dados dessa população por meio de informações do mercado de geração elétrica e relatórios empresariais. Parte da hipótese de que a participação feminina é restrita e enfrenta desafios para expansão. Mapear o cenário pode ajudar a identificar entraves no mercado e a ampliar o acesso das mulheres a oportunidades da área.

A importância da energia eólica para a economia do Nordeste, seu potencial no contexto da transição energética e das mudanças climáticas (Melo e Macedo, 2019; Dieese, 2024; IRFFI et al., 2024; FGV IBRE, 2025), junto ao vazio de informações com recorte de gênero no RN, justificam o estudo.

Em análise global sobre o ODS 5 da ONU¹, Azcona et al. (2024) defendem dados desagregados por gênero como fundamentais para identificar desigualdades e embasar políticas eficazes. Destacam, porém, a necessidade de compreender a complexidade da desigualdade, que não se limita a números. A UN Women (2023) recomenda investimento em dados, pesquisas e análises para tornar visíveis necessidades de mulheres e meninas, e a formulação de políticas inclusivas que corrijam injustiças e combatam estigmas.

¹ O ODS 5, ou Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 5, diz respeito à Igualdade de Gênero.

No setor eólico, faltam informações sobre quantas mulheres atuam, suas funções, remuneração e condições. O RN é foco do artigo por seu papel central no Brasil, mas há escassez de dados e literatura que esclareçam o “lugar da mulher” nessa indústria e suas repercussões.

2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A discussão central desta pesquisa apoia-se em estudos sobre mercado de trabalho e desigualdade de gênero, com destaque para teorias que abordam a segregação ocupacional e a sub-representação feminina em setores técnicos. Esses temas evidenciam obstáculos que as mulheres enfrentam para ingressar e se manter em áreas tradicionalmente masculinas, como as carreiras STEM, as quais envolvem as áreas de Ciência (Science), Tecnologia (Technology), Engenharia (Engineering) e Matemática (Mathematics), e ocupações industriais, incluindo as relacionadas à geração de energias renováveis.

Segundo o Fórum Econômico Mundial (WEF, 2024), há sub-representação feminina nas áreas STEM e isso contrasta com a super-representação em outros campos, geralmente com menos perspectivas de crescimento e remunerações mais baixas. Kon (2011) observa que as ocupações com presença feminina mais forte são as de escritório ou burocráticas, e as ligadas a serviços domésticos ou às empresas. Tais ocupações oferecem, segundo a autora, ganhos inferiores aos dos homens, mais rotatividade e piores condições de proteção trabalhista.

Uma diferenciação do que seria ‘trabalho de homem’ e ‘trabalho de mulher’ é percebida socialmente desde a infância e tende a indicar uma aptidão masculina mais natural que a feminina para as chamadas profissões STEM. Uma pesquisa realizada em 2017 pela Cátedra Regional UNESCO Mujer, Ciencia y Tecnología en América Latina – FLACSO Argentina, com meninos e meninas entre 6 e 10 anos residentes em Buenos Aires, na Argentina, na Cidade do México e em São Paulo, revela que, embora avaliem que tanto meninos quanto meninas possam exercer esse tipo de profissão, participantes em São Paulo - especialmente as meninas mais velhas - enxergam a Engenharia como atividade masculina, em parte por entendê-la como uma ocupação que exige força física (Cátedra Regional UNESCO, 2017, p. 107).

Fernandez (2019) aponta que diversas ocupações são tradicionalmente percebidas como adequadas para mulheres, enquanto outras não o são. A autora recorre à metáfora do ‘ piso pegajoso’, oriunda da economia feminista, para se referir às dificuldades que mulheres em ocupações de menor prestígio ou remuneração enfrentam para ascender profissionalmente. Ela destaca ainda o conceito de ‘teto de vidro’, que corresponde a barreiras invisíveis que dificultam a trajetória das mulheres e as impedem de alcançar níveis hierárquicos mais elevados. Entre esses obstáculos estão estereótipos sociais, a falta de oportunidades para que adquiram experiência em gestão, culturas empresariais hostis e obrigações domésticas.

Esses desafios são visíveis desde cedo e provocam reações de instituições de ensino e da indústria. Dois exemplos são os projetos Meninas em Ação, realizado em 2022 pelo SENAI-RN em parceria

com a agência de cooperação internacional alemã GIZ, para estimular o interesse e a participação de estudantes da rede pública em formações voltadas às energias renováveis (FIERN, 2022), e o Meninas no Espaço, iniciado em 2023 pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em parceria com a Agência Espacial Brasileira, com o objetivo principal de estimular a participação de meninas e jovens mulheres nas áreas de ciência e tecnologia espacial, promovendo igualdade de gênero e inclusão no setor (AEB, 2025).

Na indústria, o *Barbie Dream Gap*, da Mattel, fabricante da boneca Barbie, foi lançado em 2018 com a intenção, segundo Silva e Santos (2021), de inspirar o potencial ilimitado das meninas, mostrando possibilidades profissionais diversas, como forma de combater o preconceito de gênero. O conceito da iniciativa remete à “lacuna ou defasagem” nos sonhos das meninas em relação aos sonhos dos meninos, chamada na literatura de *dream gap* (PETINELLI-SOUZA, 2025). A indústria comunica ao público, assim, que meninas e mulheres podem ser o que quiserem. Mas apesar da narrativa pública de empoderamento, Silva e Santos (2021) concluem que o projeto é uma estratégia de marketing para impulsionar as vendas da boneca, legitimando estereótipos de gênero e ignorando desigualdades sociais.

Em estudos centrais para a crítica feminista das organizações, Acker (1990a, 1990b) e Acker e Van Houten (1974) afirmam que empresas e instituições não são neutras em relação ao gênero. Observam, ainda, a predominância masculina nos espaços de maior prestígio e remuneração e destacam os diferenciais entre “trabalho de homem” e “trabalho de mulher”.

No setor de energia, Czako (2020) associa a baixa presença feminina à limitada inserção em educação STEM ou em outras áreas. Desafios estruturais - como estereótipos de gênero, acesso desigual à formação, acúmulo de responsabilidades familiares e falta de ambientes de trabalho inclusivos - reforçam esse cenário nas energias renováveis (IRENA, 2024). As mulheres são 32% da força de trabalho no segmento, índice que cai para 21% no setor eólico, evidenciando-se a necessidade de enfrentar vieses de gênero - como preconceitos e estereótipos - na educação, na formação e no mercado, com ações que considerem as causas da segregação ocupacional entre homens e mulheres (IRENA, 2020; 2024).

Essa perspectiva é corroborada pelo relatório *Progress on the Sustainable Development Goals: The Gender Snapshot 2024*, da ONU (UN Women; UN DESA), que além de apontar a reduzida participação feminina no setor de energia, indica que as mulheres recebem, em média, 15% menos que os homens com a mesma qualificação. O documento também destaca a baixa presença feminina em cargos técnicos e de liderança, enquanto elas aparecem mais concentradas em funções administrativas e de apoio, com menor poder de decisão.

Entre as medidas recomendadas para transformar esse cenário estão práticas inclusivas de contratação, políticas de conciliação entre trabalho e vida pessoal, ambientes que promovam bem-estar e igualdade, e o fortalecimento de redes de mentoria e capacitação e especialmente no setor das energias renováveis (UN Women; UN DESA, 2024).

São múltiplos os benefícios potenciais sob essa perspectiva. O Fórum Econômico Mundial (WEF, 2024) afirma que avançar na igualdade de gênero no mercado, de forma geral, poderia adicionar US\$ 12 trilhões ao PIB global e aumentar em até 35% a produção econômica de alguns países. Machado *et al.*

(2023) citam diferentes estudos para apontar os impactos positivos da participação das mulheres nas dimensões sociais e econômicas, incluindo aumento de investimentos em saúde e educação infantil e redução de desigualdades entre países. No setor privado, observam ainda que a presença feminina em cargos de liderança é associada à maior produtividade de outras mulheres e ao melhor desempenho das empresas, além de inspirar outras mulheres a permanecerem na educação formal.

Segundo Bortoluzzo, Matavelli e Madalozzo (2016), a igualdade entre homens e mulheres é uma condição para o crescimento sustentável. Amartya Sen (1999, p. 249, 262-263) observa que a condição de agente e a voz ativa das mulheres, intensificada pela instrução e pelo emprego, podem influenciar a natureza da discussão pública sobre diversos temas sociais, incluindo taxas de fecundidade e prioridades para o meio ambiente.

Sen (1999, p. 262) ressalta que o ganho de poder econômico das mulheres é um dos aspectos centrais no processo de desenvolvimento em muitos países. Ele sustenta que “nada atualmente é tão importante na economia política do desenvolvimento quanto um reconhecimento adequado da participação e da liderança política, econômica e social das mulheres” (p. 263). Diz ainda que “este é um aspecto crucial do desenvolvimento como liberdade” (p. 263).

3. MÉTODO DO ESTUDO

Esta pesquisa adota abordagem mista, com predominância qualitativa. Tem caráter exploratório e descritivo, baseando-se na análise de dados secundários de fontes públicas e relatórios institucionais. A dimensão quantitativa aparece na aplicação de indicadores numéricos – como participação, remuneração média e distribuição por sexo – para descrever o cenário da presença feminina no setor eólico. Segundo Prodanov e Freitas (2013, p. 52), a pesquisa exploratória permite examinar o tema sob múltiplos ângulos, envolvendo levantamento bibliográfico e análise de casos que favoreçam compreensão. O estudo é descritivo por buscar identificar características de um grupo e descrever relações entre variáveis.

Foram analisados relatórios anuais e de sustentabilidade de empresas geradoras de energia eólica no estado, além dos “Formulários de Referência”, ou seja, documentos submetidos pelas companhias abertas à Comissão de Valores Mobiliários (CVM) que trazem dados sobre empregados e composição dos conselhos administrativos por gênero.

Também foram usados dados secundários de bases públicas, como Ministério do Trabalho e Emprego e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A RAIS, do MTE, permite analisar estoque de empregos em Eletricidade e Gás e geração de energia elétrica, incluindo vínculos em parques eólicos. Esse indicador foi sugerido pelo Ministério do Trabalho, via Lei de Acesso à Informação, por não haver CNAE específico para o setor eólico. A análise envolveu estatística descritiva. *Excel* e *Google Sheets* foram usados para organização e visualização dos dados.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Dados do setor elétrico no RN, que englobam a geração eólica, mostram que poucas mulheres são registradas em funções técnicas e em Engenharias, no mercado local. Em algumas ocupações, a participação feminina é zero (Tabela 1).

Tabela 1 - Empregos em atividades de Eletricidade e Gás, no RN, em 2024*

Ocupação	Homens	Mulheres	Total	% Mulheres	Remun. Média R\$
Eletrotécnico (prod. energia)	30	0	30	0,00	15.814,82
Téc. de manutenção elétrica	37	0	37	0,00	10.486,94
Técnico eletricista	19	0	19	0,00	7.252,78
Operador petróleo	19	2	21	9,52	23.208,19
Instalador de linhas elétricas	302	35	337	10,39	5.046,90
Eletrotécnico	180	21	201	10,45	5.625,57
Engenheiro eletricista	63	11	74	14,86	19.984,83
Eletricista de manutenção	144	27	171	15,79	5.026,23
Técnico em segurança do trabalho	16	4	20	20,00	8.094,52
Gerente administrativo	26	12	38	31,58	18.460,60
Analista de negócios	29	22	51	43,14	7.474,17
Assist. administrativo	56	44	100	44,00	3.613,56
Auxiliar de escritório	13	18	31	58,06	833,20
Administrador	32	58	90	64,44	6.891,53
Total nas ocupações	966	254	1220	20,82	7.363,48**

*Estoque de empregos nas 14 áreas com informações sobre remuneração real média | **Mediana

Fonte: Elaborada pela autora, a partir de dados da RAIS 2024 / MTE (2025)

A Tabela 1 abrange profissionais nas atividades de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica, fornecimento de gás, e produção e distribuição de vapor e água quente, no Rio Grande do Norte. Embora não seja possível filtrar informações especificamente para o setor eólico, a sub-representação feminina é evidente em funções técnicas e de Engenharia, onde estão as maiores remunerações reais médias no setor.

Um estudo do Dieese (2024) sobre o emprego em energias renováveis no Nordeste mostra que essa realidade é percebida no conjunto da região e traz a expectativa de que a transição energética considere o conceito de trabalho decente da Organização Internacional do Trabalho (OIT)², preservação e ampliação do emprego formal e inclusão da população vulnerável no mercado de trabalho. O órgão aponta pouca participação feminina nos mercados nordestinos de energia solar e eólica, assim como tendência à redução dessa população à medida que crescem empreendimentos e número total de vagas.

Entre 2016 e 2021, observa-se, a partir desse estudo, recuo de 9,2% para 8,9% na proporção de mulheres empregadas em eólicas no Nordeste, e não é possível afirmar que as energias renováveis têm permitido aumento da participação feminina no mercado (DIEESE, 2024). O Dieese indica potencial para incorporação de mais trabalhadoras na manutenção e operação dos sistemas e defende políticas mais ativas e incentivos à equidade de gênero.

No contexto do RN, o mercado de 'Eletricidade e Gás' sugere que a desigualdade identificada em escalas regional e global se reproduz no setor eólico do estado. Relatórios de empresas com resultados dos negócios, incluindo a composição da força de trabalho, reforçam esse entendimento. Participações femininas expressas nesses documentos vão de 0%, na operação (Qair Brasil e Auren, 2023), e de 12% em cargos STEM (Petrobras, 2023), a 47% no total de empregados (Shell, 2025) nas diferentes frentes em que atuam - em alguns casos para além da eólica e do Brasil.

Na CPFL Energia, que no Formulário de Referência entregue à CVM sobre 2024 registra apenas duas mulheres no Nordeste, 10,70% do quadro operacional total no Brasil é composto por profissionais do sexo feminino. Na área técnica e de supervisão as mulheres são 31,74%, número superior ao dos dois anos anteriores (23,50% em 2022 e 28,67% em 2023).

Relatórios de sustentabilidade e outros documentos públicos de empresas geradoras de energia eólica no Rio Grande do Norte, indicam progressos e metas de expansão para a força de trabalho feminina. Os números, porém, são globais, para o conjunto das regiões e setores de energia onde essas companhias atuam. Ou seja, não especificam e nem asseguram que o crescimento das mulheres na atividade também se dará no setor eólico e no RN.

Relatos de avanços femininos na esteira de ações implementadas de 2021 em diante são verificados no setor, mas também evidências de que as mulheres são minoria ou não existem em funções técnicas e de operação e manutenção. Em 2023, por exemplo, a Qair Brasil, que detém parques eólicos

² Faz referência a um trabalho produtivo e de qualidade, em condições de liberdade, equidade, segurança e dignidade humana

(<https://www.dieese.org.br/outraspublicacoes/2023/dicionarioAtividadeSindical/38.html>)

no RN e, nacionalmente, destaca como compromisso o incentivo à equidade de gênero, comemora ter chegado ao final do ano com 54% de mulheres em seu quadro geral de colaboradores, ao mesmo tempo em que admite: “No que se refere aos que atuam na operação, a presença feminina ainda é de 0%” (QAIR BRASIL, 2023).

A Auren (2024) também registra ausência de mulheres na operação, em 2023, e informa que, nas funções de nível técnico, elas somavam 9% dos colaboradores. As maiores participações femininas estavam nos cargos de assistente e consultoria. A média de tempo destinada à capacitação da equipe é outro indicador de desigualdade de gênero que apresenta. Em 2024, o tempo relativo às mulheres aumentou, mas a disparidade ainda era visível, com média de 22,1 horas de capacitação para elas e de 46,2 horas para os homens. A diferença, segundo a empresa, se deve à maior quantidade de treinamentos obrigatórios para posições que, atualmente, estão ocupadas majoritariamente por homens, como cargos de operador e técnico (AUREN, 2024).

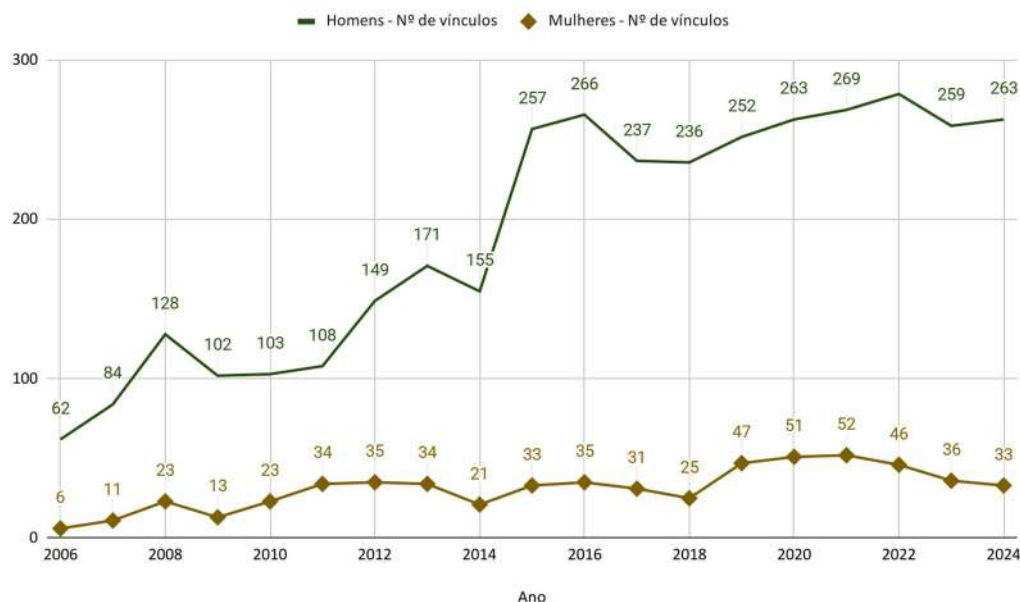
A Auren aponta como meta alcançar 50% de mulheres no quadro geral de colaboradores até 2030. Em 2023, as mulheres representavam 32,7% do quadro de lideranças da empresa e 36,8% do quadro geral. Cabe destacar ainda nesse contexto que, em outubro de 2024, a companhia concluiu a compra da AES Brasil, empresa que implantou dois parques eólicos no Brasil com operação 100% feminina - um deles no Rio Grande do Norte.

No campo da educação, o projeto no RN levou a AES a financiar, em 2023, a formação das primeiras mulheres especialistas em Operação e Manutenção (O&M) de parques eólicos, no estado. A capacitação foi ministrada pelo Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGAS-ER), do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai-RN), e oferecida de forma gratuita. Em contrapartida, a combinação de negócios com a AES levou, segundo a Auren (2024), a uma redução no percentual de mulheres no quadro geral de colaboradores de 36,8%, em 2023, para 36%, em 2024.

Considerando-se o segmento global de geração de energia elétrica e o Brasil, a RAIS mostra que a participação feminina na atividade, em 2024, foi inferior a 25% nos 14 estados listados pela Aneel com capacidade eólica instalada. A participação média foi de 16,74%. No RN, que registrou o segundo pior resultado, atrás apenas do Piauí (10,51%), ficou em 11,15%.

Os números englobam empregos na geração de energia de origens diversas (hidráulica, térmica, nuclear, eólica e solar), além dos que existem em manutenção de redes e outros nas atividades de operação e transmissão. No Rio Grande do Norte, o total de vínculos de mulheres no segmento declina. Em 2024 existiam apenas 33 registros (Gráfico 1).

Gráfico 1 - O emprego na geração de energia elétrica, no RN



Fonte: Elaborado pela autora, a partir de dados da RAIS / MTE (2025)

A Tabela 2 reforça desigualdades vistas na educação e no mercado, com menos mulheres do que homens em salas de aula e registradas como engenheiras, por exemplo.

Tabela 2 - Participação % na educação e no mercado do setor elétrico, no RN

Indicador	Homens	Mulheres
Matrículas em cursos de eólica do CTGAS-ER, em 2023	68	32
Ingressantes em Eng. Elétrica na UFRN (2013- 2019)	82,83	17,16
Registros de Eng. Elétrica ativos no Crea (em abril de 2025)	90,32	9,68

Fontes: Soppa (2023); Confea (2025) e SENAI-RN (2024)

Embora não sejam o foco deste artigo, iniciativas empresariais para ampliar a participação feminina no setor merecem menção. Exemplos incluem a formação da primeira turma de mulheres especialistas em O&M e o primeiro parque eólico com operação 100% feminina no RN (ABEEólica, 2023); a reserva de vagas para formação em Eletromecânica voltada ao setor (SENAI-RN, 2024); e compromissos ou ações de empresas desde 2021 com foco em igualdade de gênero (TotalEnergies, 2024; Copel, 2023; Auren, 2023; CPFL Renováveis, 2023; EDP Renováveis, 2023; Engie Brasil Energia, 2023; Elera Renováveis, 2023; Neoenergia, 2024; Petrobras, 2023; Shell Brasil, 2025).

A discussão envolve uma das fontes de energia vistas como rotas inevitáveis para o enfrentamento da emergência climática global (Dieese, 2024) e que oferecem benefícios como impulso à

economia local, a partir da criação de novos empregos, melhorias na infraestrutura, geração de demanda por trabalhadores qualificados e crescimento do PIB (IRFFI et al., 2024).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este artigo analisou a presença de mulheres no setor eólico do Rio Grande do Norte, com base em dados secundários e literatura sobre trabalho e formação profissional. Constatou-se a ausência de informações desagregadas por sexo e a sub-representação feminina, especialmente em funções técnicas e de Engenharia, que concentram as maiores remunerações. Em alguns casos, a participação das mulheres chega a 0%.

Os resultados sugerem que barreiras estruturais observadas em outros setores econômicos também se manifestam na área, evidenciando a necessidade de aprofundamento de pesquisas e de políticas inclusivas para ampliar oportunidades de trabalho feminino.

A análise dialoga com teorias sobre segregação ocupacional e barreiras enfrentadas por mulheres em áreas tradicionalmente masculinas, como carreiras STEM e ocupações industriais, incluindo a geração de energias renováveis. A literatura aponta, entre as medidas necessárias para transformar esse cenário, práticas inclusivas de contratação, políticas de conciliação entre trabalho e vida pessoal, ambientes que promovam bem-estar e igualdade, e o fortalecimento de redes de mentoria e capacitação, bem como a importância de enfrentar vieses de gênero - como preconceitos e estereótipos - na educação, na formação e no mercado, com ações que considerem as causas da segregação ocupacional entre homens e mulheres.

A próxima etapa da pesquisa, sujeita à aprovação do Comitê de Ética e Pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, prevê a coleta de dados primários junto a empresas, instituições de ensino e mulheres que atuam ou querem atuar no setor, permitindo aprofundar a compreensão das trajetórias de acesso, permanência e progressão profissional.

Esta pesquisa busca contribuir para a compreensão de desafios e oportunidades para mulheres no setor eólico, oferecendo evidências que podem orientar políticas públicas e privadas, ações educacionais e estratégias para tornar a indústria mais inclusiva e equitativa.

REFERÊNCIAS

ACKER, Joan. Gendered organizations theory: the influence of gender on work and employment. 1990a.

ACKER, Joan. Hierarchies, jobs, bodies: a theory of gendered organizations. *Gender & Society*, v. 4, n. 2, p. 139-158, 1990b. Disponível em: <https://www.csun.edu/~snk1966/J.%20Acker%20Hierarchies,%20Jobs,%20Bodies%20-%20A%20Theory%20of%20Gendered%20Organizations.pdf>

ACKER, Joan; VAN HOUTEN, Donald R. Differential recruitment and control: the sex structuring of organizations. *Administrative Science Quarterly*, p. 152-163, 1974.

AGÊNCIA ABEEÓLICA. Brasil sobe uma posição e fica em 5º lugar no ranking mundial. ago. 2025. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/>>. Acesso em: 03 ago. 2025.

_____. AES Brasil e SENAI formam primeiras mulheres especialistas no RN. 24 ago. 2023. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/aes-brasil-e-senai-formam-primeiras-mulheres-especialistas-no-rn-em-manutencao-e-operacao-de-eolicas/>

_____. AES Brasil terá o Complexo Eólico Cajuína operado exclusivamente por mulheres. 27 fev. 2023. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/aes-brasil-tera-o-complexo-eolico-cajuina-no-rio-grande-do-norte-operado-exclusivamente-por-mulheres/>

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB). Meninas no Espaço. Brasília: AEB, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/aeb/pt-br/acoes-e-programas/aeb-escola-1/meninas-no-espaco>

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Sistema de Informações de Geração (SIGA). 2025. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>

AUREN. Relatórios anuais 2023 e 2024. São Paulo. Disponível em: <https://ri.aurenenergia.com.br/esg/relatorio-anual-e-de-sustentabilidade-auren/>

AZCONA, Ginette et al. Why data matters for progress on gender equality. UN Women, 2024. Disponível em: <https://data.unwomen.org/features/why-data-matters-progress-gender-equality>

BORGES, Bráulio. Estimativas dos impactos dinâmicos do setor eólico sobre a economia brasileira. ABEEólica, 2022. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>

BORTOLUZZO, A. B.; MATAVELLI, I. R.; MADALOZZO, R. Determinantes da distribuição da (des)igualdade de gênero entre os estados brasileiros. Estudos Econômicos, v. 46, n. 1, p. 161-188, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ee/a/DnMF4MwRhTRqqdntFRxzqnF/?format=html&lang=pt>

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Resposta via LAI. Protocolo nº 19955.009295/2025-95. Brasília, 14 mar. 2025.

_____. Base de Dados RAIS Vínculos (2002–2021). Disponível em: <https://bi.mte.gov.br/bgcaged/rais.php>.

_____. Painel de Informações da RAIS (2022–2024). Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/>>.

CÁTEDRA REGIONAL UNESCO MUJER, CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN AMÉRICA LATINA – FLACSO Argentina; ASOCIACIÓN CIVIL CHICOS.NET. Infancia, ciencia y tecnología: un análisis de género desde el entorno familiar, educativo y cultural. 2017. Disponível em: <https://www.chicos.net/investigacion/infancia-ciencia-y-tecnologia-un-analisis-de-genero-desde-el-entorno-familiar>

COMISSÃO DE VALORES MOBILIÁRIOS (CVM). Formulários de Referência de Cias Abertas (2024). Planilhas eletrônicas [Excel]. Disponível em: https://dados.cvm.gov.br/dataset/cia_aberta-doc-fre. Acesso em: 08 mar. 2025.

CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA (CONFEA). Registros por Crea, Grupo, Modalidade, Nível, Título e Gênero. 2025. Disponível em: <https://relatorio.confea.org.br/Profissional/RegistrosPorGrupo>

COPEL. Relato Integrado 2023. Curitiba, 31 dez. 2023. Disponível em: <https://ri.copel.com/sustentabilidade/relatorios-anuais-e-socioambientais/>

CPFL ENERGIA. Relatório Anual 2023. Disponível em: <https://www.grupocpfl.com.br/sustentabilidade/relatorio-anual>

CZAKO, Veronika. Employment in the energy sector: JRC Science for Policy Report. Luxemburgo: EU Publications Office, 2020. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC120302>

DIEESE. Caracterização do emprego nas energias renováveis no Nordeste. Brasília, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/onmt/pdf/meta-1-produto-3_estudo_emprego-energias-renovaveis_jan2024.pdf/@download/file

EDP BRASIL. Relatório Anual 2023. Disponível em: <https://ri.edp.com.br/pt-br/informacoes-financeiras/relatorios-anuais/>

ELERA RENOVÁVEIS. Relatório ESG 2023. Disponível em: https://www.elera.com/wp-content/uploads/2024/06/sustentabilidade_ESG_ELERA_2023_PORT.pdf

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Resposta via LAI. Protocolo nº 18800.075106/2025-73. Brasília, 12 mar. 2025b.

ENGIE BRASIL ENERGIA S.A. Relatório de Sustentabilidade 2023. Disponível em: <https://www.engie.com.br/investidores/esg/relatorios-de-sustentabilidade/>

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE (FIERN). Meninas em Ação reúne inspirações, desafios e bolsas de estudo para estimular inclusão no setor de energia. Natal: FIERN, 11 nov. 2022. Disponível em: <https://www.fiern.org.br/meninas-em-acao-reune-inspiracoes-desafios-e-bolsas-de-estudo-em-natal-para-estimular-estudantes-ingressar-no-setor-de-energia/>

FERNANDEZ, Brena Paula Magno. Teto de vidro, piso pegajoso e desigualdade de gênero no mercado de trabalho brasileiro à luz da economia feminista: por que as iniquidades persistem? Cadernos de Campo, v. 26, 2019. Disponível em: <https://periodicos.fclar.unesp.br/cadernos/article/view/12951>

FGV IBRE. Boletim Macroregional Nordeste – PIB do Nordeste para o biênio 2023-2024: 3,2%. abr. 2025. Disponível em: <https://portalibre.fgv.br/boletim-macro-regional>

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). Global Wind Report 2024. Bruxelas: GWEC, 2024. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2024>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Resposta via LAI. Protocolo nº 18800.075106/2025-73. Brasília, 07 mar. 2025a.

_____. Classificação CNAE: 3511-5/01 - Geração de energia elétrica. Disponível em: <https://concla.ibge.gov.br/busca-online-cnae.html?subclasse=3511501&view=subclasse>. Acesso em: 31 ago. 2025b.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Renewable Energy and Jobs – Annual Review, 2020 e 2024. Abu Dhabi. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications>

_____. Wind Energy: A Gender Perspective. Abu Dhabi, 2020. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jan/IRENA_Wind_gender_2020.pdf

IRFFI, G. et al. Avaliação de impacto do FDNE na construção de parques eólicos e seus efeitos no mercado de trabalho e indicadores econômicos dos municípios na área de atuação da Sudene. Cadernos de Finanças Públicas, v. 25, n. 1, 2024. Disponível em: <https://publicacoes.tesouro.gov.br/index.php/cadernos/article/view/266>.

KON, Anita. Segmentação e informalidade do trabalho nas empresas, em uma perspectiva de gênero. Mulher e Trabalho, v. 6, 2011. Disponível em: <https://revistas.planejamento.rs.gov.br/index.php/mulheretrabalho/article/view/2723>

MACHADO, C. et al. Child penalty in STEM: evidence from Brazilian labor market. 2023. Disponível em: <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/server/api/core/bitstreams/a86ebeec-00e5-4101-8a60-200dd94b6f00/content>

MELO, E. A. O.; MACEDO, L. D. A geração de energia eólica no RN no contexto da discussão sobre desenvolvimento regional. In: SEMINÁRIO DE PESQUISA DO CCSA, 24., Natal: UFRN, 2019.

PETINELLI-SOUZA, Susane. Elas nas organizações: passado, presente, futuro. 1. ed. São Paulo: Labrador, 2025. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Elas_nas_organiza%C3%A7%C3%B5es.html?id=HrtAEQAAQB-AJ&redir_esc=y

PETROBRAS. Relatório de Sustentabilidade 2023. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.investidorpetrobras.com.br/apresentacoes-relatorios-e-eventos/relatorios-anuais/>

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. Metodologia do trabalho científico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. Disponível em: <https://www.feevale.br/Comum/midias/0163c988-1f5d-496f-b118-a6e009a7a2f9/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf>

QAIR BRASIL. Relatório de Sustentabilidade 2023. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/11ZXSeUVIqOgiZNkd9cy_9w73tjSaLtCb/view

RIO GRANDE DO NORTE. Secretaria de Desenvolvimento Econômico. Resposta via LAI. Protocolo nº 24022025222424937. 14 mar. 2025.

SEDEC–RN. Balanço do Setor Elétrico do RN – 2024. Natal, 2024. Disponível em: <http://www.sedec.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=281951&ACT=&PAGE=0&PARM=&LBL>

SEN, Amartya. Desenvolvimento como liberdade. São Paulo: Companhia das Letras, 1999.

SENAI-RN. Diretora do CTGAS-ER aponta desafios e oportunidades. 8 mar. 2024. Disponível em: <https://www.rn.senai.br/diretora-ctgas-er-aponta-desafios-e-oportunidades-para-ampliar-participacao-da-mulher-no-mercado/>

_____. SENAI-RN e Vestas dão início a programa de educação para formar profissionais de eletromecânica. 10 out. 2024. Disponível em: <https://www.rn.senai.br/em-iniciativa-conjunta-no-estado-senai-rn-e-vestas-dao-inicio-programa-para-formar-profissionais-de-eletromecanica/>

SHELL BRASIL. Relatório de Transparência Salarial 2025.1. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: https://www.shell.com.br/careers/diversity-inclusion/_jcr_content/root/main/section_1992526561/call_to_action/links/item0.stream/1743191209247/1c6e70fce11d540e0cf4d96dd837452ee00d65e/pay-transparency-report-2025.pdf

SILVA, Gabriella Alves Guimarães; SANTOS, Sheila Daniela Medeiros dos. Barbie Dream Gap: das profissões inspiradoras à legitimação das desigualdades sociais. In: SEMINÁRIO DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO, 8., Goiânia, 2021. Disponível em: https://www.academia.edu/115283246/Barbie_Dream_Gap_Das_Profiss%C3%B5es_Inspiradoras_%C3%80_Legitima%C3%A7%C3%A3o_Das_Desigualdades_Sociais?uc-sb-sw=6475395

SOPPA, R. N. S. A presença das mulheres no ensino superior: UFRN. Natal, 2023. TCC (Graduação) – UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/f7b422f2-9ba9-4d08-bd9b-c855cce8f920>

TOTALENERGIES. Form 20-F 2024: Annual Report Pursuant to Section 13 or 15(d) of the Securities Exchange Act of 1934 – For the fiscal year ended December 31, 2024. 2024. Disponível em: <https://totalenergies.com/investors/publications-and-regulated-information/regulated-information/annual-financial-reports>

UN WOMEN; UN DESA. Progress on the Sustainable Development Goals: The Gender Snapshot 2024. New York: UN, 2024. Disponível em: <https://www.unwomen.org/en/digital-library/publications/2024/09/progress-on-the-sustainable-development-goals-the-gender-snapshot-2024>

Complexidade Ambiental no licenciamento ambiental de Parques Eólicos *Offshore*: Estudo de Caso do *Hotspot* da Região Sudeste

Autores Luiz Ramos¹, Juliana Argento^{1,2}, Aline Kloh¹, Guilherme Machado¹, Mauricio Hernández^{1,3}

¹ EnvironPact Sustentabilidade e Resiliência; ² Programa de Pós-Graduação em Ecologia, UFRJ;

³ Centro de Pesquisa de Energia Elétrica, Eletrobras

luiz.ramos@environpact.com, juliana.argento@environpact.com, aline.kloh@environpact.com,
guilherme.machado@environpact.com, mauricio.hernandez@environpact.com

RESUMO

No Brasil, o recurso eólico *offshore* apresenta potencial superior ao continental, configurando-se como uma importante alternativa para diversificar ainda mais a matriz energética nacional. No entanto, os benefícios associados à instalação dos Parques Eólicos *Offshore* (PEOs) também trazem consigo preocupações quanto às possíveis interferências socioambientais desses empreendimentos. Nesse contexto, o licenciamento ambiental federal constitui um instrumento essencial para a avaliação e mitigação dos impactos. Este trabalho teve como objetivo analisar o cenário atual dos processos de licenciamento ambiental para a região Sudeste, a fim de avaliar a complexidade ambiental que os empreendedores podem encontrar ao propor projetos nessa área. A análise identificou 22 projetos com Fichas de Caracterização da Atividade (FCAs) protocoladas, evidenciando o interesse do setor privado na expansão dessa fonte renovável. Contudo, a elevada sensibilidade ambiental da região reforça a necessidade de estudos preliminares específicos que avaliem fatores ecológicos relevantes, contribuindo para a viabilidade dos empreendimentos.

Palavras-chaves:

Parques Eólicos *Offshore*; Licenciamento Ambiental; Impactos Ambientais; Região Sudeste

ABSTRACT

In Brazil, offshore wind resources present greater potential than onshore sources, representing a key opportunity to further diversify the country's energy matrix. However, alongside the benefits of implementing Offshore Wind Farms (OWFs), concerns have been raised regarding their potential social and environmental impacts. In this context, the federal environmental licensing process plays a crucial role in assessing and mitigating such impacts. This study aimed to analyze the current status of environmental licensing processes for the Southeast region, in order to assess the environmental complexity developers may encounter when proposing projects in this area. The analysis identified 22 projects with submitted Activity Characterization Forms (FCAs), demonstrating strong interest from the private sector in this renewable energy source. Nevertheless, the high environmental sensitivity of the Southeast region highlights the need for site-specific preliminary studies to assess relevant ecological factors and support the environmental feasibility of future developments.

Keywords:

Offshore Wind Farms; Environmental Licensing; Environmental Impacts; Southeast Region.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, recurso e potencial eólico *offshore* superam o continental, sendo uma importante fonte de energia renovável que poderá diversificar ainda mais a matriz energética do Brasil, com potencial técnico¹ variando entre 700 e 1.200 GW (EPE, 2020 e Banco Mundial, 2024), havendo uma grande expectativa do setor sobre as regras específicas para os leilões de áreas para o desenvolvimento dos Parques Eólicos *Offshore* (PEOs). No entanto, apesar dos benefícios associados à implantação desta atividade, também são discutidas as diversas interferências socioambientais que este tipo de empreendimento pode apresentar, tanto para instalação de parques com fundações fixas (Hernández *et al.*, 2021) ou flutuantes (Maxwell *et al.*, 2022).

Sendo assim, os impactos ambientais potenciais da eólica *offshore* precisam ser identificados corretamente e avaliados (diferença entre o ambiente com e sem o projeto). Esta avaliação busca desenvolver projetos que apresentem melhores soluções tecnológicas, locais, ambientais e sociais (Guimarães, 2020). Neste contexto, o licenciamento ambiental torna-se um dos principais instrumentos para avaliar os impactos ambientais efetivos e potenciais de um empreendimento específico em escala local.

Conforme disposto na Lei Complementar nº 140/2011 e regulamentado pelo Decreto nº 8.437/2015, o licenciamento ambiental de usinas eólicas *offshore* e localizadas na zona de transição terra-mar são de competência da União, sendo atribuição do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Atualmente, o IBAMA soma 104 processos de licenciamento abertos de PEOs na costa brasileira, com potência total de aproximadamente 250 GW (sem contar as sobreposições). Estes projetos encontram-se distribuídos no nordeste (margem equatorial), sudeste e sul (IBAMA, 2025a).

Considerando o potencial de desenvolvimento desta atividade, a região Sudeste destaca-se como uma área com maior potencial técnico para a instalação dos PEOs, devido às condições favoráveis de vento, da infraestrutura portuária, menor conflito com atividades turísticas e maior disponibilidade de informações ambientais. Estas e outras tendências como a experiência da indústria *offshore*, a redução de custos com a maturação do mercado e localização estratégica em relação aos principais centros de consumo energético do país, tornam a região sudeste um potencial local para a instalação do primeiro PEO (Silva, 2025).

Dado o exposto, o presente trabalho objetiva analisar o atual cenário dos processos em licenciamento ambiental no IBAMA para a região Sudeste como base para avaliar a complexidade ambiental que os empreendedores podem encontrar ao estabelecer projetos nesta área de interesse.

2. MÉTODO DO ESTUDO

Para identificar os empreendimentos eólicos *offshore* propostos na região Sudeste do Brasil, foi utilizado o documento de referência que consolida os Parques Eólicos com processos de licenciamento ambiental abertos no IBAMA. A partir da identificação desses projetos, foram realizadas solicitações formais de acesso à informação por meio do Sistema Eletrônico do Serviço de Informação ao Cidadão (e-SIC), com o objetivo de analisar o andamento processual e obter os principais documentos protocolados pelos empreendedores e pela equipe técnica do IBAMA. Assim, com base nas etapas do licenciamento ambiental federal, os empreendimentos foram classificados conforme seu status de avanço.

Para a análise da complexidade ambiental utilizou-se como referência o Termo de Referência (TR) padrão para empreendimentos eólicos *offshore*, os documentos associados à Licença Prévia (LP) do projeto piloto

¹ “Recurso” considera as condições meteorológicas e climáticas do vento (velocidade, direção, estabilidade e frequência), já o “Potencial” possui vários níveis sendo o técnico o potencial que pode ser explorado considerando a tecnologia atual disponível comercialmente e não considera as restrições, sensibilidades ou vulnerabilidades legais ou socioambientais.

do SENAI ISI-ER (IBAMA, 2025b) e a consulta a banco de dados governamentais, e documentos técnicos (ex: Petrobras, 2013; MAREM, 2016; ICMBio/MMA, 2017; MMA, 2018, 2025) para mapear fatores ambientais relevantes.

Adicionalmente, uma revisão da literatura científica nacional e internacional sobre impactos ambientais da energia eólica *offshore* de fundação fixa e flutuante (Hernández *et al.* 2021; Maxwell *et al.*, 2022) permitiu identificar fatores ambientais relevantes para a avaliação de potenciais impactos ambientais.

Dentre estes fatores destacam-se: i) a sensibilidade de comunidades bentônicas e recifes, especialmente diante da instalação de estruturas submarinas; ii) à emissão de ruído subaquático e da interferência em rotas de navegação, que afetam principalmente mamíferos marinhos e comunidades pesqueiras, relacionados a levantamentos sísmicos necessários para a instalação dos empreendimentos; iii) a sobreposição com habitats sensíveis, os conflitos com usos tradicionais da zona costeira, como a pesca artesanal, e a fragilidade de comunidades bentônicas frente à instalação de cabos submarinos, componentes essenciais para a transmissão de energia dos PEOs até o continente.

Dessa forma, a metodologia adotada integrou a análise documental dos processos de licenciamento ambiental com a revisão de bases técnicas e científicas, possibilitando a identificação dos empreendimentos propostos, a compreensão do estágio em que se encontram e o mapeamento de fatores ambientais críticos a serem considerados na avaliação de impactos. Essa abordagem permitiu estabelecer uma base robusta para a análise da complexidade ambiental envolvida na implantação de PEOs na região Sudeste, contribuindo para o entendimento dos desafios regulatórios, ecológicos que permeiam o avanço desses projetos no contexto brasileiro.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Panorama do processo de licenciamento ambiental de eólica *offshore* na região sudeste

O processo de licenciamento ambiental de empreendimentos eólicos *offshore* para obtenção da Licença Prévia (LP) tem início com o envio da Ficha de Caracterização da Atividade (FCA), documento eletrônico que formaliza a intenção do empreendedor e subsidia a avaliação inicial do IBAMA. Em seguida, o órgão ambiental analisa as informações contidas na FCA e emite o Termo de Referência (TR), que define o escopo e os critérios técnicos para a elaboração do Estudo de Impacto Ambiental e do respectivo Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA).

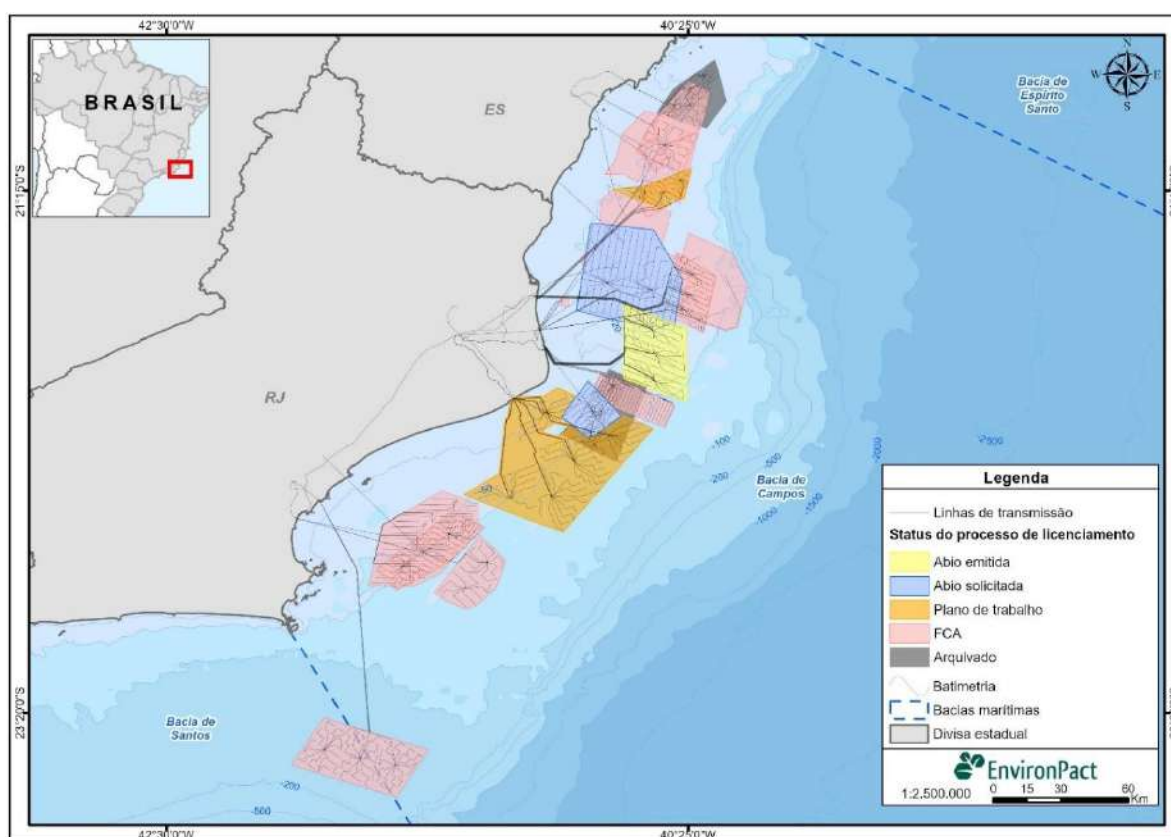
Antes da elaboração do EIA/RIMA, caso haja necessidade de coleta de dados primários em campo, o empreendedor pode protocolar Planos de Trabalho descrevendo as metodologias a serem aplicadas durante a amostragem. Nesses documentos, geralmente, são informadas a malha amostral, as metodologias de campo e analíticas, além do número de campanhas previstas. A amostragem deve ter como objetivo a obtenção de dados primários que subsidiem o diagnóstico socioambiental do EIA/RIMA. Assim, o protocolo dos Planos de Trabalho antes da realização da amostragem demonstra o compromisso do empreendedor em seguir as diretrizes do TR e atender às expectativas do órgão ambiental.

Após parecer favorável do IBAMA quanto aos Planos de Trabalho, quando as atividades envolvem coleta de material biológico, captura ou marcação de animais silvestres *in situ* e/ou transporte de material biológico, é necessária a solicitação da Autorização de Captura, Coleta e Transporte de Material Biológico (ABIO), cuja emissão é pré-requisito para o início das campanhas amostrais.

Concluídas as coletas de dados primários e a elaboração dos estudos ambientais, o EIA/RIMA é protocolado para análise técnica e, posteriormente, para a realização de audiências públicas. Caso seja atestada a viabilidade do empreendimento, o processo segue para a emissão da LP e, conforme o avanço do projeto, são emitidas a Licença de Instalação (LI) e a Licença de Operação (LO), mediante o cumprimento das condicionantes estabelecidas nas fases anteriores.

Considerando o processo descrito, a análise dos processos de licenciamento ambiental junto ao IBAMA para PEOs na área Sudeste do Brasil identificou 22 protocolos de FCA, conforme ilustrado na **Figura 1**. A análise histórica revelou que, desses processos, 15 permanecem na etapa inicial de protocolo da FCA, sem avanço para as fases subsequentes do licenciamento, sendo dois deles formalmente arquivados. Entre os processos com algum grau de evolução, cinco protocolaram seus Planos de Trabalho, dos quais três solicitaram a ABIO, mas apenas um obteve a autorização até o momento.

Figura 1 - Status de licenciamento ambiental dos processos abertos no IBAMA para Parques Eólicos Offshore na Região Sudeste. (Fonte: IBAMA, 2025. Elaborador por EnvironPact).



Importante destacar que, até a elaboração deste artigo, nenhum processo apresentou protocolo de EIA/RIMA, tampouco houve emissão de Licença Prévia na região Sudeste. Assim, embora o mapa disponibilizado pelo IBAMA indique uma elevada busca por abertura de processos, poucos projetos avançaram no licenciamento ambiental, não chegando sequer à etapa de protocolo dos Planos de Trabalho.

A etapa de elaboração de Planos de Trabalho requer uma avaliação detalhada dos requisitos estabelecidos no TR para o desenvolvimento do diagnóstico socioambiental, com base em dados secundários. Na ausência de informações suficientes, torna-se necessária a complementação por meio da coleta de dados primários. Nesse sentido, compreender previamente a complexidade ambiental da área pretendida para a instalação de PEO pode subsidiar diagnósticos mais robustos e orientar decisões que assegurem a viabilidade ambiental de futuros empreendimentos.

3.2. Complexidade ambiental da região Sudeste e os potenciais impactos ambientais dos PEOs

A elaboração do EIA/RIMA de PEOs deve seguir as diretrizes técnicas estabelecidas pelo TR padrão, que define, entre outros aspectos, os requisitos mínimos a serem contemplados nos diagnósticos dos meios

físico, biótico e socioeconômico que subsidiarão a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) do empreendimento.

Cabe ressaltar que esse TR contempla a avaliação dos impactos associados a todas as estruturas do projeto, incluindo as unidades geradoras de energia eólica; a rede conectora submarina; a subestação marítima; a rede de transmissão de energia (compreendendo seus trechos submarino, terrestre subterrâneo e aéreo até a conexão com o Sistema Interligado Nacional – SIN); a subestação terrestre e as áreas de apoio exclusivas para a obra. Dessa forma, no âmbito do diagnóstico dos meios físico e biótico, o estudo deverá abranger tanto os ambientes terrestre quanto marinho, com o objetivo de caracterizar suas condições prévias à instalação do empreendimento.

A integração de informações espaciais com o conhecimento técnico-científico sobre a biodiversidade regional constitui um instrumento essencial para a identificação preliminar de áreas ambientalmente sensíveis, contribuindo para um processo de licenciamento mais eficiente e embasando a tomada de decisão quanto à escolha de locais para a instalação de empreendimentos eólicos *offshore*.

Deste modo, o presente estudo avaliou os principais fatores biológicos passíveis de sofrer impactos diretos em todas as fases do desenvolvimento desse tipo de empreendimento (instalação, operação, manutenção e descomissionamento). Nesse sentido, foi realizada uma análise espacial da complexidade ambiental que sintetiza alguns dos fatores relevantes a serem abordados nos EIA's de PEOs (**Figura 2 e Figura 3**).

Conforme ilustrado na **Figura 2**, os projetos PEOs previstos para a região Sudeste encontram-se total ou parcialmente sobrepostos a zonas de sensibilidade ecológica, incluindo áreas de concentração e rotas migratórias de espécies marinhas, como mamíferos, quelônios, aves, além da presença de corais e bancos biogênicos de algas calcárias. Dentre essas sobreposições, destacam-se regiões prioritárias para desova e rotas migratórias de tartarugas marinhas, especialmente da espécie *Caretta caretta* (tartaruga-cabeçuda), áreas de concentração de mamíferos marinhos e a Rota Atlântica de migração de aves neárticas. Embora em menor escala, foram ainda identificadas ocorrências de corais em setores pleiteados para a instalação de alguns empreendimentos.

Figura 2 - Áreas de concentração e Rotas migratórias de mamíferos marinhos, quelônios, aves, bancos de algas e presença de corais da região Sudeste brasileira de interesse para a implantação Parque Eólico offshore (Fonte: ICMbio, 2011; MAREM, 2016; ICMbio, 2017; CEMAVE/ICMBio, 2022. Elaborado por EnvironPact).

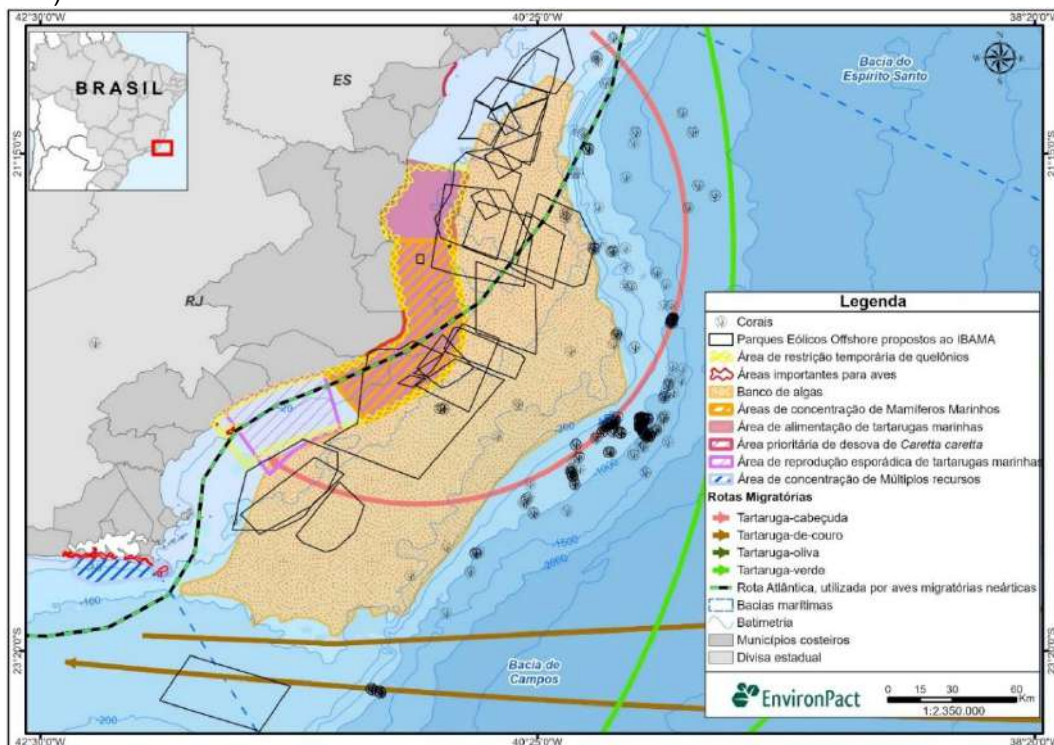
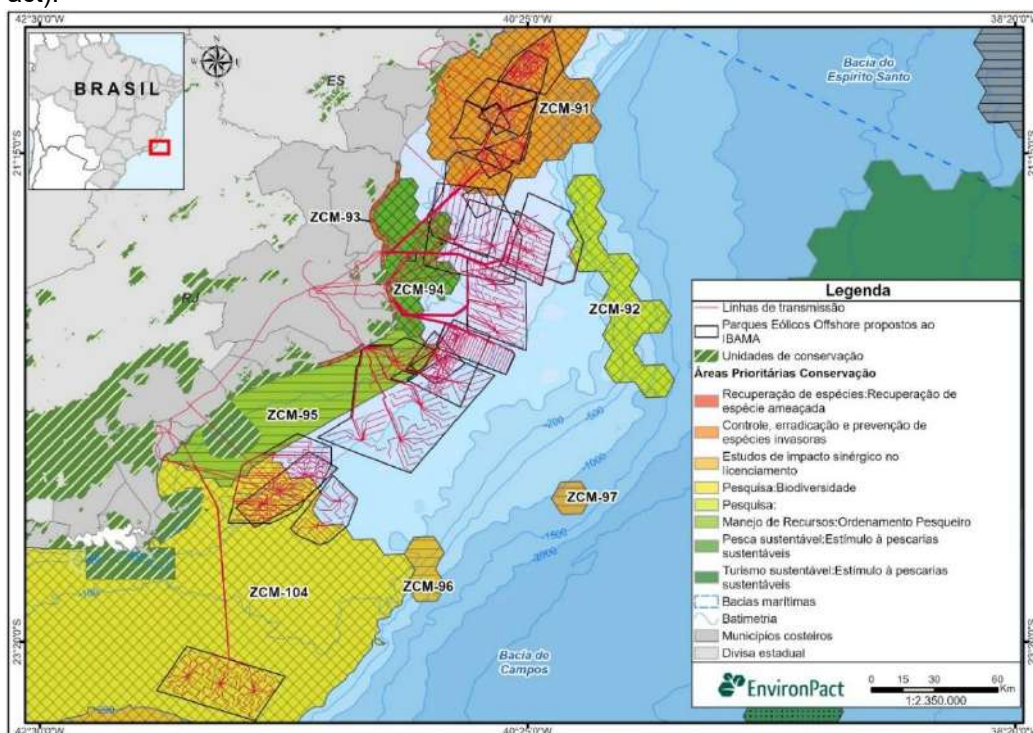


Figura 3 - Áreas Prioritárias à Conservação e Unidades de Conservação presentes na região Sudeste brasileira de interesse para a implantação Parque Eólico offshore (Fonte MMA, 2018; 2025. Elaborado por EnvironPact).



Adicionalmente, ainda no ambiente marinho, observa-se que a maioria dos empreendimentos se sobrepõe a áreas prioritárias situadas entre o norte do Rio de Janeiro e o sul do Espírito Santo (**Figura 3**). Na região capixaba, os projetos estão majoritariamente sobre a ZCM-91, área destinada ao controle, erradicação e prevenção de espécies exóticas invasoras. Já os projetos localizados do norte fluminense até o Cabo de São Tomé encontram-se sobre as ZCM-94 e ZCM-95, voltadas principalmente ao ordenamento pesqueiro e à promoção da pesca sustentável. Destaca-se ainda a ZCM-93, situada na faixa litorânea, cuja importância está relacionada à recuperação de espécies ameaçadas, especialmente pela ocorrência de desova de tartarugas marinhas. Em uma porção mais ao sul, ressalta-se a presença de uma Unidade de Conservação e da ZCM-104, cuja relevância está atrelada à pesquisa da biodiversidade (MMA, 2018).

No que se refere às Unidades de Conservação terrestres presentes nos municípios onde estão previstas a instalação de linhas de transmissão, verifica-se que a maioria dos projetos apresenta traçados que se sobrepõem a, pelo menos, uma unidade (**Figura 3**). Diante disso, é recomendável a reavaliação dos trajetos propostos, a fim de evitar entraves nas etapas subsequentes do processo de licenciamento.

Dentre os grupos faunísticos mencionados, a região próxima ao Cabo de São Tomé se destaca pela alta concentração de mamíferos marinhos, como o boto-cinza (*Sotalia guianensis*), o golfinho-de-dentes-rugosos (*Steno bredanensis*), o golfinho-nariz-de-garrafa (*Tursiops truncatus*) e a toninha (*Pontoporia blainvillei*) (MMA, 2007). Além dessas espécies, a região também compõe a rota migratória de baleias, como a jubarte (*Megaptera novaeangliae*), principalmente durante o inverno e a primavera do Hemisfério Sul (Di Beneditto *et al.*, 2001; Parente *et al.*, 2017). Das espécies citadas, o boto-cinza é classificado como “Vulnerável” e a toninha como “Criticamente em Perigo” na Lista Nacional de Espécies da Fauna Ameaçadas de Extinção (MMA, 2022).

Os mamíferos marinhos apresentam comportamento fortemente baseado no uso de ondas sonoras. Embora se reconheça que apenas os odontocetos possuem um sistema de ecolocalização altamente desenvolvido, é bem estabelecido que outros mamíferos marinhos também utilizam o som, tanto de forma passiva — para percepção ambiental — quanto ativa, na comunicação entre indivíduos (Würsig, 2009).

Um dos principais impactos causado pelo desenvolvimento de PEO é a geração de ruídos, seja durante a fase de instalação das turbinas ou na fase de operação da atividade, os quais podem gerar efeitos diversos a depender da espécie, distância da fonte geradora e da capacidade de adaptação. Assim, o potencial impacto do ruído, especificamente em mamíferos marinhos, a longo prazo pode ser alto, considerando que o som é utilizado para comunicação, ecolocalização, predação *etc.* desses animais (Guimarães, 2020).

No que se refere à avaliação das tartarugas marinhas, a região Sudeste abriga as cinco espécies presentes no litoral brasileiro: *Caretta caretta* (tartaruga-cabeçuda), *Chelonia mydas* (tartaruga-verde), *Dermochelys coriacea* (tartaruga-de-couro), *Eretmochelys imbricata* (tartaruga-de-pente) e *Lepidochelys olivacea* (tartaruga-oliva). A maioria dessas espécies encontra-se classificada em alguma categoria de ameaça, tanto em âmbito nacional quanto internacional, com exceção da tartaruga-verde, considerada ameaçada apenas em nível global (MMA, 2022; IUCN, 2025).

Diversos estudos indicam que o litoral norte fluminense abriga o segundo maior sítio de desova da tartaruga-cabeçuda no Brasil, considerando a densidade média anual de ninhos (Marcovaldi & Chaloupka, 2007). A temporada reprodutiva ocorre entre os meses de setembro e março, com pico de desova entre novembro e janeiro, e nascimento dos filhotes até abril (Petrobras, 2013; MAREM, 2016; ICMBio/MMA, 2016).

Diante desse contexto, foi instituída a Instrução Normativa Conjunta IBAMA/ICMBio nº 1/2011, que classifica a área compreendida entre os municípios de Macaé (RJ) e São Francisco do Itabapoana (RJ) — na divisa com o Espírito Santo — como Área 1, prioritária para a conservação das tartarugas marinhas. Nessa área, atividades de exploração e produção de petróleo e gás estão sujeitas a restrições sazonais, vigentes de 1º de outubro até o último dia de fevereiro (IBAMA/ICMBio, 2011).

Embora originalmente voltada ao setor de óleo e gás, tal norma pode ser considerada no contexto dos PEOs, especialmente durante a instalação das torres e, em particular, dos cabos submarinos que venham a alcançar o continente pelo litoral compreendido entre os municípios citados.

No que se refere à avifauna, além da proximidade com a Rota Migratória do Atlântico, a costa norte do Rio de Janeiro e o sul do Espírito Santo destacam-se pela presença de diversos ambientes úmidos, como estuários, manguezais e lagoas costeiras, ecossistemas ricos e complexos que favorecem a alimentação e o repouso de aves migratórias provenientes do Hemisfério Norte (Freesz *et al.*, 2005).

A expressiva diversidade de espécies de aves nas áreas pretendidas para a instalação de PEOs (MMA, 2007; ICMBio/MMA, 2017; MAREM, 2016; CEMAVE, 2022; MMA, 2025) reforça a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre os impactos dessa atividade, considerando os efeitos negativos já observados sobre esse grupo faunístico, tais como colisões com aerogeradores, perda de habitats e o chamado “efeito barreira” (Ijntema *et al.*, 2025).

No que se refere à comunidade bentônica e à presença de ambientes recifais, a região avaliada apresenta uma plataforma continental composta por um complexo mosaico de bancos biogênicos. Apesar da relevância ecológica desses habitats, os dados secundários disponíveis sobre a região são ainda generalistas, conforme observado em estudos de Amaral & Rossi-Wongtschowski (2004), Curbelo-Fernandez *et al.* (2017), Mincarone *et al.* (2016) e MMA (2018).

No que tange à ictiofauna da região, além da ser recomendado um manejo e ordenamento pesqueiro, destaca-se também que estão presentes áreas definidas como estratégia de conservação de Tubarões e Raias pelo Plano de Ação Nacional (PAN) (ICMBio, 2023).

Além dos grupos já mencionados, e conforme orientações do TR, o diagnóstico do meio biótico deve contemplar os quirópteros, a vegetação e a fauna terrestres. No que se refere aos quirópteros, esses animais apresentam ampla capacidade de deslocamento em razão do voo, estando largamente distribuídos na região Sudeste (Reis *et al.*, 2013). No entanto, há escassez de informações específicas sobre a utilização do ambiente marinho por morcegos no Brasil (Costa *et al.*, 2006; Esbérard & Moreira, 2006; Menezes Júnior *et al.*, 2008).

Em empreendimentos em terra, os morcegos são considerados um dos grupos mais afetados pela geração de energia por turbinas eólicas, principalmente em decorrência de colisões com aerogeradores e ocorrência de barotrauma (Barclay *et al.*, 2007; Kunz *et al.*, 2007; Cryan & Barclay, 2009; Rydell *et al.*, 2010; Grodsky *et al.*, 2011; Arnett *et al.*, 2016). Diante da lacuna de conhecimento sobre o uso do espaço marinho por esses organismos, o IBAMA tem recomendado a realização de coleta de dados primários sobre quirópteros nos estudos ambientais de empreendimentos eólicos *offshore*, a fim de subsidiar uma caracterização mais adequada desse grupo faunístico (IBAMA, 2020).

Por fim, não foram verificados dados secundários específicos sobre a vegetação e a fauna terrestres nas áreas interceptadas pelos projetos. Assim, durante a elaboração do EIA, deve ser realizado o levantamento de dados primários que deve abranger, principalmente, a faixa de instalação da linha de transmissão até o Sistema Interligado Nacional (SIN), com a devida avaliação do estado de conservação dos fragmentos florestais interceptados, além da coleta de informações sobre as espécies presentes, seu status de ameaça, endemismo e possíveis indicadores ecológicos.

Ressalta-se, ainda, que parte dos empreendimentos avaliados apresenta traçados sobrepostos a Unidades de Conservação terrestres, o que reforça a importância da identificação precisa dessas áreas, especialmente as de proteção integral, a fim de evitar conflitos com os objetivos de conservação e entraves nas fases subsequentes do licenciamento.

3.3. Desafios e Oportunidades

A análise dos processos de licenciamento ambiental referentes aos PEOs na região Sudeste do Brasil revela um cenário ainda incipiente, com predominância de projetos em fase inicial de tramitação junto ao órgão licenciador federal. A maioria dos empreendimentos permanece na primeira etapa de licenciamento que é o protocolo da Ficha de Caracterização da Atividade (FCA). Este fato é importante em dois contextos: a) mostrar o interesse do setor privado nesta nova fonte de geração renovável, uma vez que foram abertos 22 processos de licenciamento na região Sudeste; e b) evidencia um entrave no avanço dos processos em licenciamento, que mesmo após a publicação da Lei nº 15.097/2025 de geração elétrica *offshore*, ainda persistem lacunas significativas na consolidação do marco regulatório infralegal, na regulação dos leilões e atualização do TR padrão. A ausência de normativas claras e coordenadas nessas frentes compromete a previsibilidade e a segurança jurídica necessárias para atrair investimentos e viabilizar o prosseguimento das etapas subsequentes do licenciamento ambiental.

Por outro lado, neste período em que ainda há indefinições com relação aos leilões de área, os desenvolvedores podem atuar em outras frentes de avaliação prévia ao licenciamento dos PEOs. Mesmo com pontos de melhoria, a liberação da metodologia de definição de áreas publicada pela EPE² estabelecem um avanço na indústria, apontando avaliações para o aprimoramento do projeto, considerando, não somente aspectos de geração e distribuição de energia, mas aspectos logísticos, econômicos e socioambientais desde etapas iniciais de planejamento dos projetos, visando garantir sua sustentabilidade (Hernández, 2024). Como indicam diferentes guias de melhores práticas para mitigação de impactos em fontes de geração energética renovável, mais do 70% dos impactos destas fontes são efetivamente evitados durante a etapa de conceito e planejamento inicial dos parques (Bennun *et al.*, 2021).

No contexto socioambiental, o TR padrão proposto pelo IBAMA é um norteador para esta avaliação preliminar, pois ele estabelece diretrizes técnicas e exigências para o diagnóstico socioambiental e a aquisição de dados primários, tanto o meio marinho quanto terrestre. Porém, embora esta publicação seja uma oportunidade de avanço no processo de licenciamento, se evidencia a necessidade de uma atualização, pois diferentes tecnologias, tanto dos projetos quanto das ferramentas de levantamento e mitigação de impactos, têm avançado, mostrando um desafio na hora de consolidar um processo de licenciamento no contexto atual.

As análises da complexidade ambiental tendem a ser cada vez mais robustas para garantir uma evolução sustentável dos projetos no longo prazo. Um exemplo são as análises de impacto na paisagem que são absolutamente dependentes da tecnologia (tamanho), localização (visualização desde a costa), percepção (ponto de avistamento) e aceitação (conceito de paisagem do observador) (Boem, 2021).

Dessa forma, foi realizada este tipo de avaliação para a região de interesse para a implantação de PEO's na região Sudeste, considerando os fatores ambientais do meio biótico. De modo geral, não foram identificadas áreas específicas com entrave à obtenção de licença, contudo, a possibilidade de haver bancos biogênicos no assoalho marinho e a presença de área de restrição periódica devido à desova de tartarugas entre a linha de costa dos municípios de Macaé/RJ e São Francisco do Itabapoana/RJ e presença de Unidades de Conservação são questões que devem ser consideradas no desenvolvimento dos projetos.

Além disso, apesar da literatura apresentar dados secundários sobre a presença e comportamento de tartarugas marinhas na região, a frequência de uso dessas áreas ainda requer confirmação por meio de campanhas de dados primários. Situação semelhante é observada para aves marinhas e insulares, cuja sazonalidade e padrões de ocorrência permanecem pouco definidos, sendo necessária a realização de amostragens específicas para subsidiar diagnósticos mais robustos.

² Metodologia em fase de consulta pública.

Para mamíferos marinhos e ictiofauna, ainda é necessário um maior detalhamento de aspectos biológicos, como avaliação de áreas de concentração, padrões migratórios, reprodução, composição e estrutura populacional, além de identificação de espécies sensíveis à pressão sonora. A presença de espécies ameaçadas e migratórias, bem como a possibilidade de existência estruturas biogênicas no fundo marinho, reforçam a necessidade de desenvolvimento de Planos de Trabalho bem estruturados, com descrição de métodos atualizados de amostragem para o levantamento de dados primários.

Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de realização de diagnósticos ambientais adequados e bem fundamentados, capazes de refletir a realidade ecológica da área de estudo do empreendimento. Diagnósticos insuficientes tendem a resultar em reiteradas solicitações de complementação por parte do órgão licenciador, o que não apenas sobrecarrega a análise técnica e consome recursos institucionais, como também acarreta atrasos no cronograma do processo e aumenta os custos para os empreendedores.

Além disso, sem um conhecimento ambiental consolidado, há o risco de se investir em projetos situados em áreas com alta sensibilidade ecológica, o que pode inviabilizar a implantação ou demandar medidas compensatórias de elevado custo e complexidade. Portanto, essas informações são fundamentais não apenas para a avaliação adequada dos impactos, mas também para subsidiar a definição de medidas de mitigação e compensação ambiental proporcionais à sensibilidade ecológica das áreas envolvidas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A região Sudeste apresenta 22 projetos de Parques Eólicos *Offshore* com FCA's protocoladas no IBAMA, evidenciando o interesse do setor privado nessa nova fonte de geração renovável. No entanto, a ausência de avanços na consolidação do marco regulatório infralegal para os leilões de áreas marítimas tem contribuído para a estagnação dos processos junto ao órgão ambiental.

Apesar dessas indefinições, os empreendedores podem avançar em etapas preliminares ao licenciamento, como a realização de estudos ambientais iniciais. A região Sudeste apresenta uma elevada sensibilidade ambiental, o que reforça a importância de estudos preliminares específicos para as áreas definidas para o projeto que avaliem fatores ambientais relevantes, para identificar pontos sensíveis, contribuindo para a mitigação de riscos à viabilidade ambiental dos empreendimentos.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, A. C. Z. & ROSSI-WONGTSCHOWSK, C. L. B., 2004. **Biodiversidade Bentônica da Região Sudeste-Sul do Brasil – Plataforma Externa e Talude Superior**. Projeto REVIZEE Score Sul - São Paulo - Instituto Oceanográfico - USP, 2004. — (Série documentos REVIZEE: Score Sul) 216pp.
- ARNETT, E.B; BAERWALD, E.F.; MATHEWS, F.; RODRIGUES, L.; RODRÍGUEZ-DURÁN, A.; RYDELL, J.; VILLEGAS-PATRACA, R; VOIGT, C.C. 2016. Impacts of wind energy development on bats: a global perspective. In: VOIGT, C.C. & KINGSTON, T. (Eds) *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World*. **Springer International Publishing**, Cham. 2016.
- BANCO MUNDIAL. 2024. Cenários para o Desenvolvimento de Eólica Offshore no Brasil. Banco Mundial, Washington, DC. Licença: Creative Commons Atribuição CC BY 3.0 IGO.
- BARCLAY, R.M.R.; BAERWALD, E.F. & GRUVER, J.C. 2007. Variation in bat and bird fatalities at wind energy facilities: assessing the effects of rotor size and tower height. **Canadian Journal of Zoology**. 2007.
- BENNUN, L., VAN BOCHOVE, J., FLETCHER, C., WILSON, D., PHAIR, N., CARBONE, G. *Industry guidance for early screening of biodiversity risk - offshore wind*. Gland, Switzerland: IUCN and Cambridge, UK: The Biodiversity Consultancy. 2021.

BOEM (BUREAU OF OCEAN ENERGY MANAGEMENT). **Historic Properties Cumulative Visual Effects Assessment**. Project Nº 0486909. 2021

CEMAVE/ICMBio (CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE AVES SILVESTRES/INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE). **Relatório de áreas de concentração de aves migratórias no Brasil**. 4ª edição. 2022.

COSTA, L.M.; FERNANDES, A.F.P.D.; MORAES, D.; CONDE, C.F.V.; JORDÃO-NOGUEIRA, T. & ESBÉRARD, C.E.L. Deslocamento de *Artibeus fimbriatus* sobre o mar. **Chiroptera Neotropical**. 2006.

CRYAN, P.M. & BARCLAY, R.M.R. Causes of bat fatalities at wind turbines: hypotheses and predictions. **Journal of Mammalogy**. 2009.

CURBELO-FERNANDEZ, M.P., DELLA GIUSTINA, I.D., LOIOLA, L.L., ARANTES, R.C.M., MOURA, R.B., BARBOZA, C.A.M., NUNES, F.S., TÂMEGA, F.T.S., HENRIQUES, M.C.M.O., FIGUEIREDO, M.A.O., FALCÃO, A.P.C., ROSSO, S. 2017. Biota de fundos carbonáticos da plataforma continental da Bacia de Campos: algas calcárias e fauna associada. In: Curbelo-Fernandez, M.P., Braga, A.C., editoras. Comunidades Demersais e Bioconstrutores: caracterização ambiental regional da Bacia de Campos, Atlântico Sudoeste. Rio de Janeiro: Elsevier. **Habitats**, v. 4. p. 15-42.

DI BENEDITTO, A.P.M.; RAMOS, R.M.A.; LIMA, N.R.W., 2001. Sightings of *Pontoporia blainvillei* (Gervais & D'Orbigny, 1844) and *Sotalia fluviatilis* (Gervais, 1853) (Cetacea) in South-eastern Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, 44(3) 291-296.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). 2020. **Roadmap Eólica Offshore Brasil – Perspectiva e caminhos para a energia eólica marítima**. No NT-EPE-PR-001/2020-r2.

ESBÉRARD, C.E.L. & MOREIRA, S.C. Second record of *Lasiurus ega* (Gervais) (Mammalia: Chiroptera, Vespertilionidae) over the South Atlantic. **Brazilian Journal of Biology**. 2006.

FREESZ, N.P.; NOVELLI, R. & CORDEIRO JUNIOR, L.S.A. 2005. **Dinâmica da avifauna da Lagoa do Açú, Norte Fluminense, RJ**. In: VII Congressos de Ecologia do Brasil; Caxambu, Brasil. São Paulo: Sociedade de Ecologia do Brasil.

GRODSKY, S.M.; BEHR, M.J.; GENDLER, A. DRAKE, D.; DIETERLE, B.D.; RUDD, R.J. & WALRATH, N.L. Investigating the causes of death for wind turbine-associated bat fatalities. **Journal of Mammalogy**. 2011.

GUIMARÃES, B. S. **O licenciamento ambiental de empreendimentos eólicos offshore: histórico mundial e diretrizes para o Brasil**. 2020. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

HERNANDEZ C., O.M; SHADMAN, M.; AMIRI, M. M.; SILVA, C.; ESTEFEN, S. F.; LA ROVERE, E. Environmental impacts of offshore wind installation, operation and maintenance, and decommissioning activities: A case study of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 110994, 2021.

HERNANDEZ, O. M. C. **Strategic Planning for Offshore Wind Energy: A Methodological Framework for Increasing Its Sustainability**. Tese de Doutorado. PPE/COPPE/UFRJ. 2024.

IBAMA/ICMBio (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS/ INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE). **Instrução Normativa 1, de 27 de maio de 2011**. 2011.

IBAMA (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS). **Termo de Referência – Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental EIA/RIMA. Tipologia: Complexos Eólicos Marítimos (Offshore)**. 2020.

IBAMA, 2025a. Complexos Eólicos Offshore. Projetos com Processo de Licenciamento Ambiental Aberto no IBAMA. Atualizado em 10/03/2025. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20250311_Eolicas_Offshore_Ibama_marco_25.pdf. Acesso em: jul. 2025

IBAMA, 2025b. Licença Prévia (LP) Nº 709/2025 – Referente à/ao Usina Eólica Offshore Sítio de Testes Offshore de Aerogeradores de Areia Branca. NÚMERO DO PROCESSO: 02001.000678/2023-11. SEI 23758067.

ICMBio (INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE). **Plano de Ação Nacional para a Conservação dos Tubarões e Raias Marinhos Ameaçados de Extinção**. 2023.

ICMBio (INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE). **Plano de ação nacional para a conservação das Tartarugas marinhas**. Brasília: ICMBio. 120 p. 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/pan/pan-tartarugas-marinhas/1-ciclo/pan-tartarugas-livro.pdf>. Acesso em: out. de 2022.

ICMBio (INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE). **Guia de Licenciamento Tartarugas Marinhas - Diretrizes para Avaliação e Mitigação de Impactos de Empreendimentos Costeiros e Marinhos**. Brasília: ICMBio. 130 p. 2017

ICMBio (INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE). **Plano de ação nacional para a conservação das Tartarugas marinhas**. Brasília: ICMBio. 120 p. 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/pan/pan-tartarugas-marinhas/1-ciclo/pan-tartarugas-livro.pdf>. Acesso em: jul. de 2025.

ICMBio/MMA (INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE/MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Relatório Anual de Rotas e Áreas de Concentração de aves migratórias no Brasil**. Cabelo, PB: CEMAVE/ICMBio. 63p. 2016.

ICMBio/MMA (INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE/MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). 2017. **Plano de Ação Nacional para a Conservação dos Ambientes Coralíneos**. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/pan/pan-corais>. Acesso em: mai. 2025.

IJNTEMA, G. J.; HEIDA, N.; LEEMANS, J. J.; GYIMESI, A.; POTIEK, A. Collision effects of North Sea wind turbines on bird species within the “Kader Ecologie & Cumulatie (KEC). Waarden Burg, Ecology. 2025.

IUCN (INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE AND NATURAL RESOURCES). 2025. **The IUCN Red List of Threatened Species**. Versão 2025-1. Disponível em: www.iucnredlist.org. Acesso em: mar. 2025.

KUNZ, T.H.; ARNETT, E.B.; ERICKSON, W.P.; HOAR, A.R.; JOHNSON, G.D.; LARKIN, R.P.; STRICKLAND, M.D.; THRESHER, R.W.; TUTTLE, M.D. Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses. **Frontiers in Ecology and the Environment**. 2007.

MARCOVALDI, M. Â.; CHALOUPKA, M. Conservation status of the loggerhead sea turtle in Brazil: an encouraging outlook. **Endangered Species Research**, v. 3, n. 2, p. 133-143, 2007.

MAREM (MAPEAMENTO AMBIENTAL PARA RESPOSTA À EMERGÊNCIA NO MAR). 2016. **Banco de Dados**. Disponível em: www.marem-br.com.br. Acesso em: out. 2022.

MAXWELL, S. M.; KERSHAW, F.; LOCKE, C. C.; CONNERS, M. G.; DAWSON, C.; AYLESWORTH, S. LOOMIS, R.; JOHNSON, A. Potential impacts of floating wind turbine technology for marine species and habitats. **Journal of Environmental Management**. V. 307. 2022.

MENEZES JÚNIOR, L.F.; DUARTE, A.C.; NOVAES, R.L.M.; FAÇANHA, A.C.; PERACCHI, A.L.; COSTA, L.M.; FERNANDES, A.F.P.D.; ESBÉRARD, C.E.L. Deslocamento de *Artibeus lituratus* (Olfers, 1818) (Mammalia, Chiroptera) entre ilha e continente no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Biota Neotropica**. 2008.

MINCARONE, M.M.; ABREU, T.B.; ALMADA, D.S.; BAUER, A.B.; BLANCHETTE, T.G.; CAMARGO, G.A.; CARDOSO, M.W.; COSTA, R.N.; DI DARIO, F.; DIAS, F.C.; FERNANDES, D.S.; FISCHER, L.G.; FREITAS, R.R.; GESTINARI, L.M.S.; GONÇALVES, P.R.; KONNO, T.U.P.; LEAL, G.F.; MANCINI, P.L.; PAGLIANI, B.; PETRY, A.C.; RAJÃO, H.; RUTA, C.; ESTEVES, F.A. 2016. **Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima de Campos**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental, 84 p.

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). 2007. **Áreas Prioritárias para Conservação, uso sustentável e repartição da biodiversidade brasileira**. Atualização: Portaria MMA Nº 9 de 23 de janeiro de 2001. MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas. 301 p.

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). 2018. **Áreas Prioritárias para Conservação, uso sustentável e repartição da biodiversidade brasileira. Segunda atualização**. MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Disponível em: www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/ecossistemas-1/conservacao-1/areas-prioritarias/2a-atualizacao-das-areas-prioritarias-para-conservacao-da-biodiversidade-2018. Acesso em: jun. 2025

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). 2022. **Portaria MMA Nº 148, de 7 de junho de 2022**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mma-n-148-de-7-de-junho-de-2022-406272733>. Acesso em: jun. 2025.

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). 2025. **Download de dados geográficos**. Disponível em: Download de dados geográficos (mma.gov.br).. Acesso em: jul. 2025.

PARENTE, C.L.; MOURA, J. F.; SECCO, H. K. C.; DI BENEDITTO, A. P. M. Diversidade e distribuição de cetáceos na área de influência das atividades de E&P na Bacia de Campos. p. 35-61, In Reis, E.C. & Curbelo-Fernandez, M.P. (eds.). Mamíferos, quelônios e aves: caracterização ambiental regional da Bacia de Campos, Atlântico Sudoeste. Rio de Janeiro: **Elsevier. Habitats**, 152 p. 2017.

PETROBRAS. **Projeto de Caracterização Regional da Bacia de Campos (PCR-BC/Habitats). Volume 8 - Mamíferos, quelônios e aves - Relatório Final**. Revisão Final. 236pp. 2013.

REIS, N.R.; FREGONEZI, M.N.; PERACCHI, A.L. & SHIBATTA, O.A. Morcegos do Brasil – Guia de Campo. Rio de Janeiro, **Technical Books**. 2013.

RYDELL, J.; BACH, L.; DUBOURG-SAVAGE, M.J.; GREEN, M.; RODRIGUES, L.; HEDENSTRÖM, A. Bat mortality at wind turbines in northwestern Europe. **Acta Chiropterologica** 2010.

SILVA, L. C. G. **Avaliação do Recurso Eólico Offshore na Costa Sudeste do Brasil**. TCC – Graduação em Engenharia do Petróleo. Instituto do Mar/UFSP. 2025

WÜRSIG, Bernd; WÜRSIG, Melany (Ed.). **The dusky dolphin: master acrobat off different shores**. Academic Press, 2009.

Energia Eólica Offshore e Cooperação Internacional: Lições da Missão Técnica Brasil-China

Everton Coelho de Medeiros¹, Alberto Lima Santos¹, Ulisses Vieira Junior², Paulo Henrique Cordeiro², Caroline Cabral Fernandes da Costa³

¹Instituto SENAI de Inovação em Manufatura Avançada, ²China Three Gorges Brasil S.A., ³SENAI Departamento Nacional

everton.medeiros@sp.senai.br, alberto.santos@sp.senai.br, ulisses.junior-ext@ctgbr.com.br,
paulo.cordeiro@ctgbr.com.br, caroline.fernandes@senaicni.com.br

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados da missão de mobilidade realizada pelo representante do Instituto SENAI de Inovação em Manufatura Avançada à China em 2024, no âmbito do programa de mobilidade internacional apoiado pela “CTG Brasil” e SENAI Departamento Nacional. Ao longo de 52 dias, foram visitadas 27 instituições nas cidades de Shanghai, Beijing, Xi'an, Jiaxing, Wuhan e Zhangpu. A missão teve como foco a prospecção de parcerias técnicas e acadêmicas com ênfase em energia eólica offshore, hidrogênio verde, estruturas flutuantes e tecnologias de manutenção preditiva. Foram realizados encontros com universidades, empresas e centros de pesquisa, além da presença no evento China Wind Power 2024. Durante a missão, discutiram-se temas como sensoriamento remoto, algoritmos de posicionamento de turbinas, robótica para manutenção de pás eólicas, uso de nanosatélites para análise de potencial eólico e aplicação de manufatura aditiva. O artigo detalha as atividades desenvolvidas, as tecnologias observadas e os potenciais de cooperação para o desenvolvimento de soluções inovadoras adaptadas à realidade brasileira no setor energético.

Palavras-chaves:

Energia eólica offshore; Cooperação internacional; Hidrogênio verde; China; SENAI; Inovação tecnológica.

ABSTRACT

This article presents the results of the mobility mission carried out by the representative of the SENAI Institute for Innovation in Advanced Manufacturing to China in 2024, within the scope of the international mobility program supported by “CTG Brasil” and SENAI National Department. Over the course of 52 days, 27 institutions were visited in the cities of Shanghai, Beijing, Xi'an, Jiaxing, Wuhan and Zhangpu. The mission focused on prospecting technical and academic partnerships with an emphasis on offshore wind energy, green hydrogen, floating structures and predictive maintenance technologies. Meetings were held with universities, companies and research centers, in addition to the presence at the China Wind Power 2024 event. During the mission, topics such as remote sensing, turbine positioning algorithms, robotics for wind blade maintenance, the use of nanosatellites for wind potential analysis and the application of additive manufacturing were discussed. The article details the activities developed, the technologies observed and

As opiniões e conclusões expressas neste artigo são de responsabilidade exclusiva dos autores e não representam, necessariamente, a visão ou endosso da “CTG Brasil”.

the potential for cooperation for the development of innovative solutions adapted to the Brazilian reality in the energy sector.

Keywords:

Offshore wind energy; International cooperation; Green hydrogen; China; SENAI; Technological innovation.

1. INTRODUÇÃO

O setor energético global vem passando por transformações profundas impulsionadas pelas metas de descarbonização, segurança energética e inovação tecnológica. Nesse contexto, a energia eólica offshore, o hidrogênio verde e a digitalização de processos de operação e manutenção emergem como temas centrais para o futuro das matrizes energéticas sustentáveis.

Com o objetivo de fortalecer as capacidades técnicas e institucionais do Brasil nesses temas, foi realizada em 2024 uma missão técnica à China, promovida pelo I Edital CTG-SENAI de Mobilidade Internacional. Esta iniciativa se insere no âmbito da Plataforma de Inovação Técnica e Científica da “CTG Brasil” com o SENAI, além de compor o conjunto de ações do Programa de Mobilidade Internacional dos Institutos SENAI de Inovação (Rede ISI). A missão é coordenada pela Superintendência de Relações Internacionais (SRI), em alinhamento com as diretrizes da Superintendência de Tecnologia e Inovação (SITEC) do SENAI-Departamento Nacional (SENAI-DN).

Ao longo de 52 dias, foram visitadas 27 instituições distribuídas nas cidades de Shanghai, Beijing, Xi’an, Jiaxing, Wuhan e Zhangpu. A agenda técnica incluiu reuniões com universidades, centros de pesquisa, empresas de tecnologia e órgãos governamentais. As atividades tiveram como foco a prospecção de parcerias em áreas como energia eólica offshore, produção de hidrogênio verde, sensoriamento remoto, estruturas flutuantes, manutenção preditiva e manufatura aditiva.

Este artigo apresenta os principais resultados da missão, destacando as tecnologias observadas, os potenciais de cooperação com instituições chinesas e as oportunidades para aplicação desses conhecimentos no contexto brasileiro. A sistematização das visitas é apresentada na Seção 4, acompanhada de considerações sobre temas técnicos e estratégicos para a inovação no setor energético brasileiro.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**2.1 O Potencial Brasileiro para a Energia Eólica Offshore e Hidrogênio Verde**

O Brasil desponta internacionalmente como um dos países com maior potencial para geração de energia renovável. Embora a matriz elétrica nacional já seja predominantemente limpa, com forte presença da energia hidráulica e da eólica onshore, a entrada da energia eólica offshore representa uma nova fronteira tecnológica e econômica.

Segundo dados atualizados do IBAMA (BRASIL, 2024), até março de 2025, 104 projetos de parques eólicos offshore encontram-se em processo de licenciamento ambiental, totalizando mais de 280 GW em capacidade instalada proposta. Estimativas de Vinhoza et al. (2023) apontam que o Brasil possui um potencial técnico de geração offshore de 489,3 TWh/ano, o que corresponde a mais de três vezes o consumo nacional de eletricidade.

A aprovação do Marco Legal da Eólica Offshore (Lei nº 14.514/2022) trouxe diretrizes regulatórias para a cessão de uso de espaços marítimos, fomentando o interesse de grandes players internacionais e incentivando o fortalecimento da cadeia produtiva nacional. Regiões como o Nordeste, com alta qualidade

de ventos e infraestrutura portuária, estão no centro dessa expansão (EPE, 2023). O SENAI inclusive vem focando no tema na região através de iniciativa do Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis que recentemente foi contemplado com a primeira licença para projeto de energia eólica offshore em Areia Branca/RN (FIERN, 2025).

Esse potencial não se limita à geração de eletricidade. Ele se conecta diretamente a outro vetor estratégico global: o hidrogênio verde, que depende de eletricidade renovável em larga escala e baixo custo para ser economicamente viável. Estados como Ceará, Rio Grande do Norte, Bahia e Pernambuco já iniciaram projetos pilotos em zonas portuárias, alinhando a agenda de energia com os compromissos climáticos e as oportunidades de exportação (IPEA, 2023; ABSOLAR, 2024).

2.2 O Papel da Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D+I) no Setor de Energia

O setor energético brasileiro demanda inovação constante para lidar com desafios como a intermitência de fontes renováveis, a integração ao sistema elétrico nacional, o desenvolvimento de soluções flutuantes, e a criação de tecnologias para monitoramento, operação e manutenção de ativos em ambientes marítimos.

Historicamente, o Brasil apresenta uma estrutura sólida de fomento à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D+I) no setor de energia, impulsionada especialmente pelos recursos oriundos da cláusula de investimento obrigatório das agências reguladoras, como a ANEEL e a ANP (ANEEL, 2023). Projetos oriundos desses fundos já viabilizaram avanços em áreas como smart grids, geração distribuída, armazenamento de energia e eólica onshore.

Entretanto, o avanço das renováveis offshore e do hidrogênio exige um salto tecnológico que integra engenharia naval, digitalização, robótica, inteligência artificial, manufatura aditiva, entre outras disciplinas emergentes. Nesse cenário, as ações de P&D precisam ser mais ágeis, orientadas à experimentação, com maior conexão entre universidades, institutos de pesquisa e empresas (CNI, 2021).

O protagonismo de Institutos de Ciência e Tecnologia (ICTs) como os Institutos SENAI de Inovação (ISI), universidades federais, e centros de pesquisa será central para transformar conhecimento científico em soluções aplicadas. Além disso, o incentivo a testes em campo, bancos de prova, protótipos e validação experimental torna-se essencial para mitigar riscos tecnológicos e acelerar a maturidade das soluções (CGEE, 2022).

2.3 Cooperação entre Empresas e Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs)

A conexão entre empresas e ICTs tem se consolidado como vetor estratégico da inovação em países que lideram a transição energética. Modelos bem-sucedidos de colaboração internacional, como os parques tecnológicos europeus e os clusters de inovação asiáticos, evidenciam que a união entre demanda tecnológica real (empresas) e capacidade de resposta (academia e centros de pesquisa) é crucial para transformar desafios em oportunidades de mercado (OECD, 2022).

No Brasil, apesar dos avanços, ainda existem lacunas de articulação entre setores produtivos e estruturas científicas. A promoção de missões internacionais, como a realizada por meio do I Edital CTG-SENAI de Mobilidade Internacional 2024, representa uma estratégia assertiva para estreitar esses laços, prospectar boas práticas e gerar conexões estruturantes.

Essa iniciativa conjunta da “CTG Brasil” e da Rede ISI/SENAI, com apoio da Superintendência de Relações Internacionais (SRI) e da Superintendência de Tecnologia e Inovação (SITEC), é um exemplo concreto de como políticas de inovação podem ser aplicadas de forma pragmática. Ao levar pesquisadores e especialistas para conhecer infraestruturas avançadas de ensino, laboratórios de manutenção, fábricas de

turbinas, centros de monitoramento e empresas de P&D na China, o programa oferece uma plataforma de aprendizado direto e articulação de parcerias técnico-científicas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Energia Eólica Offshore: Estado da Arte e Avanço Global

A energia eólica offshore se consolidou nas últimas duas décadas como uma das mais promissoras fontes de geração renovável em escala global. Seu crescimento é impulsionado por fatores como maior estabilidade dos ventos no ambiente marinho, viabilidade técnica de grandes turbinas e a necessidade de diversificação da matriz energética em países desenvolvidos.

Segundo a IRENA (2023), a capacidade instalada global de eólica offshore ultrapassou 64 GW em 2022, com projeções de atingir 380 GW até 2035, impulsionadas principalmente pela Europa, China e Estados Unidos. A China lidera a expansão, tendo ultrapassado o Reino Unido em potência instalada offshore desde 2021, com um modelo baseado em manufatura local, integração vertical da cadeia e forte investimento estatal (GWEC, 2024).

No Brasil, o cenário ainda é embrionário, mas promissor. O país apresenta um dos maiores potenciais técnicos do mundo, com destaque para a região costeira do Nordeste, que alia qualidade de ventos, proximidade de centros de carga e infraestrutura portuária disponível (VINHOZA et al., 2023). O avanço regulatório, com a promulgação da Lei nº 14.514/2022, permitiu maior segurança jurídica e estimulou a entrada de empresas nacionais e internacionais no pipeline de projetos.

Embora ainda sem empreendimentos instalados, o Brasil já figura entre os principais países em volume de projetos em fase de licenciamento ambiental, com 104 propostas em análise no IBAMA até março de 2025, representando mais de 280 GW em capacidade proposta (BRASIL, 2024).

3.2 Técnicas de Levantamento de Potencial Eólico Offshore

A caracterização precisa do recurso eólico é um fator crítico para a viabilidade técnica e econômica de projetos offshore. Ao contrário de empreendimentos onshore, onde é possível instalar torres anemométricas em solo, no mar o custo e a complexidade dessa estrutura tornam o uso de tecnologias alternativas de medição essencial.

Entre as técnicas mais utilizadas, destacam-se:

- LiDAR (Light Detection and Ranging) flutuante, capaz de medir perfis verticais de vento com alta resolução temporal e espacial. Sua principal vantagem é a mobilidade, baixo impacto ambiental e redução de custos frente a torres meteorológicas offshore (IEA WIND TASK 32, 2023).
- Modelos atmosféricos de mesoescala, como os dados de reanálise ERA5 e WRF (Weather Research and Forecasting), calibrados com dados históricos e sensores orbitais. Esses modelos são fundamentais na fase de pré-viabilidade e para simulações de longo prazo (MORAES et al., 2022).
- Satélites de observação da Terra, que fornecem séries históricas sobre direção e intensidade dos ventos, uso do solo, topografia oceânica e variáveis meteorológicas relevantes (FERREIRA et al., 2020).

A combinação de técnicas baseadas em dados medidos e simulados permite maior acurácia na estimativa da energia gerada (AEP), bem como na avaliação da viabilidade econômica dos projetos.

3.3 Manutenção Preditiva e Inspeção de Pás Eólicas Offshore

A operação e manutenção de turbinas eólicas offshore é um dos maiores desafios técnicos e econômicos do setor. Estima-se que os custos de O&M (Operation and Maintenance) representem até 30% do custo nivelado de energia (LCOE) de projetos offshore (DNV, 2023). Entre os componentes críticos, as pás eólicas são especialmente vulneráveis devido à sua exposição direta a intempéries, erosão, delaminação e impactos com corpos estranhos.

As abordagens modernas de manutenção preditiva e inspeção de pás vêm evoluindo rapidamente e incluem:

- Inspeção por drones autônomos, equipados com câmeras de alta resolução e algoritmos de detecção de falhas por visão computacional. Essa técnica reduz o tempo de parada, elimina riscos humanos e permite diagnóstico preciso (BIRKEMOSE et al., 2021).
- Sensoriamento embutido com fibra óptica (FBG), piezoelétricos ou acelerômetros, que possibilitam o monitoramento em tempo real da integridade estrutural das pás (DAMMANN et al., 2023).]
- Modelos de gêmeo digital (digital twin) integrados com dados SCADA e históricos de manutenção, que permitem prever falhas e simular cenários de degradação, antecipando intervenções corretivas com base em risco (FENG et al., 2019).

Embora essas tecnologias sejam aplicadas inicialmente em parques offshore, elas são perfeitamente adaptáveis aos parques onshore já instalados no Brasil, como forma de aumentar a disponibilidade das turbinas e reduzir custos operacionais.

3.4 Integração entre Energia Eólica Offshore e Hidrogênio Verde

A produção de hidrogênio verde (H₂V) a partir de eletrólise da água alimentada por fontes renováveis tem sido cada vez mais considerada como elemento-chave para a descarbonização de setores industriais, transporte pesado e produção de combustíveis sintéticos. Nesse contexto, a energia eólica offshore desponta como uma das principais fontes renováveis com potencial para fornecer a energia necessária para a eletrólise em larga escala.

A complementaridade entre essas duas tecnologias é favorecida por fatores técnicos e econômicos:

- A alta capacidade de geração dos parques eólicos offshore, com fatores de capacidade superiores a 50% em diversas regiões costeiras brasileiras (VINHOZA et al., 2023), que permite operação por grandes períodos dos eletrolisadores.
- A proximidade com grandes centros industriais e portos no litoral facilita a integração com cadeias logísticas e projetos de exportação.
- A possibilidade de instalação de unidades flutuantes de eletrólise junto aos parques offshore reduz perdas de transmissão e viabiliza hubs energéticos descentralizados no mar (IEA, 2022).

Segundo a IRENA (2023), o hidrogênio verde poderá representar até 12% do consumo global de energia final até 2050, sendo a energia eólica offshore uma das principais fontes renováveis para sua produção. Na Europa e na Ásia, consórcios já estão desenvolvendo projetos integrados, como o SeaH2Land, no Mar do Norte, e o Zhangpu Green Hydrogen Hub, na China, ambos associando produção eólica offshore com grandes eletrolisadores.

No Brasil, estudos de pré-viabilidade já apontam a região Nordeste como altamente favorável para a produção e exportação de hidrogênio verde por meio de hubs costeiros, como o Porto de Pecém (CE), Porto de Suape (PE) e Porto do Açu (RJ), todos em fase de estruturação para receber projetos-piloto associados à geração renovável (EPE, 2023).

4. MÉTODO DO ESTUDO

Este estudo resulta de uma missão técnica internacional realizada entre março e maio de 2024 no âmbito do I Edital CTG-SENAI de Mobilidade Internacional, uma iniciativa conjunta entre o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e a “CTG Brasil”, como parte do Programa de Mobilidade Internacional da Rede ISI, coordenado pela Superintendência de Relações Internacionais (SRI) e alinhado às diretrizes da Superintendência de Tecnologia e Inovação (SITEC) do SENAI Nacional.

A missão teve duração de 52 dias e contemplou visitas técnicas, reuniões institucionais e encontros com lideranças de 27 instituições chinesas, incluindo universidades, empresas, centros de pesquisa e órgãos governamentais, com foco em áreas estratégicas como energia eólica offshore, hidrogênio verde, sensoriamento remoto e manutenção de turbinas eólicas.

4.1 Etapa de Planejamento no Brasil

Antes do embarque, foi conduzida uma preparação intensiva que incluiu ações logísticas e institucionais. Entre as principais estratégias adotadas, destacam-se:

- Instalação e uso do aplicativo WeChat, essencial para comunicação na China, uma vez que o uso de e-mails é pouco difundido no meio corporativo chinês. O aplicativo viabilizou o agendamento de reuniões e o acesso direto a contatos empresariais e acadêmicos;
- Contato com órgãos consulares brasileiros na China, que atuaram como ponte institucional e facilitaram o acesso a empresas locais e eventos estratégicos;
- Elaboração de cartas institucionais de apresentação, redigidas em inglês e, sempre que possível, com tradução para o mandarim, aumentando a taxa de resposta positiva dos interlocutores chineses;
- Ativação de contatos com multinacionais parceiras do SENAI e da “CTG Brasil”, que contribuíram com recomendações e aproximações com empresas chinesas de interesse;
- Colaboração com universidades brasileiras com parcerias prévias com instituições chinesas, o que facilitou o estabelecimento de conexões acadêmicas mesmo com barreiras institucionais presentes em universidades na China.

4.2 Execução da Missão Técnica

Durante os 52 dias da missão, foram realizadas visitas técnicas, reuniões e apresentações em seis cidades chinesas estratégicas: Shanghai, Beijing, Xi'an, Jiaxing, Wuhan e Zhangpu. As instituições visitadas incluíram universidades, centros de pesquisa, empresas de base tecnológica e grandes players do setor energético.

As interações foram estruturadas em três formatos principais:

- Visitas técnicas em instalações industriais e laboratórios de pesquisa;
- Reuniões institucionais de prospecção e alinhamento técnico, com foco em futuras cooperações e projetos conjuntos;
- Discussões técnicas e apresentações mútuas de capacidades, explorando temas de interesse bilateral.

As observações foram sistematizadas em registros temáticos, com ênfase nas potencialidades de aplicação no contexto brasileiro e nas sinergias com os desafios tecnológicos da transição energética.

4.3 Temas Prioritários da Missão

A missão concentrou-se nos seguintes temas técnicos:

- Tecnologias para energia eólica offshore, com foco em fundações flutuantes, integração ao sistema elétrico e modelagem computacional;
- Técnicas de levantamento de potencial eólico, incluindo uso de LiDAR flutuante, sensores radar e dados via satélite;
- Manutenção preditiva de turbinas eólicas offshore, com destaque para inspeção, reparo e reciclagem de pás eólicas;
- Integração entre energia eólica offshore e hidrogênio verde, abordando produção offshore, sistemas de armazenamento e transporte;
- Sensoriamento remoto e manufatura avançada, incluindo robótica para inspeção e impressão 3D aplicada a estruturas e componentes de turbinas;
- Modelos de relacionamento entre empresas e Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs), destacando ecossistemas de inovação integrados.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Resultados para o SENAI/SESI

Como resultado imediato da missão, foi possível apresentar a atuação nacional e internacional do SENAI para diferentes instituições chinesas que, até então, não tinham conhecimento sobre a dimensão e capilaridade da instituição no Brasil. Durante as visitas, universidades, centros de pesquisa e empresas demonstraram forte interesse em estabelecer parcerias por meio de cooperação técnica e científica.

Instituições de ensino e pesquisa como a Tsinghua University (Figura 1) manifestaram interesse de colaborações com os Institutos SENAI de Inovação (ISI), por meio de missões bilaterais, intercâmbio de pesquisadores e participação conjunta em projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D).



Figura 1 – Visita técnica à Tsinghua University.

No campo empresarial, uma das principais fabricantes de turbinas eólicas da China, demonstrou interesse em estabelecer parcerias voltadas à formação técnica e de engenharia, destacando o potencial do SENAI na capacitação de mão de obra para o setor energético. Por sua vez, empresas do setor espacial mostraram interesse em desenvolver iniciativas conjuntas relacionadas ao uso de nano satélites e tecnologias emergentes, com potencial aplicação no monitoramento de ativos offshore.

No âmbito de inovação e tecnologia, foram discutidas possibilidades de submissão conjunta de propostas em chamadas binacionais, como as já organizadas por algumas agências de fomento estaduais. Além disso, surgiram oportunidades de colaboração com uma das universidades, na área de estruturas flutuantes para turbinas offshore, e no desenvolvimento de ferramentas digitais para análise de viabilidade técnica de instalações offshore e efeitos de esteira.



Figura 2 – Visita técnica ao ICARE/HUST.

5.2 Resultados para a Indústria Brasileira

A missão também proporcionou avanços concretos para o setor energético nacional, sobretudo em um momento de ascensão da energia eólica offshore no Brasil. A recente aprovação do Marco Legal da Eólica Offshore (Lei nº 14.801/2024) impulsionou o número de pedidos de licenciamento ambiental no IBAMA, que já somam 104 projetos até março de 2025 (BRASIL, 2025). Segundo Vinhoza et al. (2023), o potencial de geração dessa matriz no Brasil pode chegar a 489,3 TWh, evidenciando o impacto estratégico desse segmento.

Ao observar o estágio atual da energia eólica offshore na China, os participantes da missão puderam antever os desafios e oportunidades que o Brasil enfrentará. Essa experiência se torna essencial para preparar instituições, empresas e trabalhadores brasileiros para os requisitos técnicos, regulatórios e logísticos da transição energética.

A missão também evidenciou que o avanço da energia eólica offshore exigirá adaptações em toda a cadeia de valor da indústria. Desde as atividades de levantamento de potencial eólico, passando pela engenharia de turbinas, instalações e plataformas, até operações de manutenção e gestão portuária, há oportunidades de atuação para empresas nacionais e multinacionais, além de uma demanda crescente por capacitação especializada.

De forma mais imediata, empresas como a “CTG Brasil”, parceira da iniciativa, obtiveram insights estratégicos para expandir sua atuação do onshore para o offshore.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A missão de mobilidade técnica realizada na China representou um marco relevante para o fortalecimento institucional do SENAI, o avanço da agenda brasileira em energia eólica offshore e a construção de alianças estratégicas com universidades, centros de pesquisa e empresas chinesas. A abrangência da missão — com visitas a 27 instituições e participação em um evento internacional do setor — superou as expectativas iniciais e proporcionou uma experiência imersiva de cooperação técnica, científica e cultural.

Foram identificadas oportunidades concretas para o desenvolvimento conjunto de tecnologias inovadoras, projetos de pesquisa colaborativa e produção científica, com destaque para temas como plataformas flutuantes, manutenção inteligente, sensoriamento remoto e sistemas digitais para mapeamento e operação de turbinas offshore. A missão permitiu visualizar com profundidade o estágio de maturidade tecnológica da China nessa temática, oferecendo ao Brasil uma referência prática para a construção de sua própria jornada de transição energética no ambiente marítimo.

Entre as lições aprendidas, destaca-se a importância do planejamento antecipado e da articulação institucional para o sucesso da missão. O uso de plataformas locais de comunicação, como o WeChat, o contato com órgãos consulares, a elaboração de cartas de apresentação em inglês e mandarim, além da aproximação com câmaras de comércio e universidades brasileiras parceiras, foram estratégias determinantes para a efetivação das visitas. O engajamento de empresas multinacionais com atuação na China e já parceiras do SENAI também facilitou o acesso a interlocutores estratégicos.

Do ponto de vista técnico, foi possível identificar que a energia eólica offshore chinesa já se encontra em fase de consolidação, com políticas públicas claras, subsídios específicos, normatização avançada e estruturas industriais robustas. Isso oferece uma base sólida para que o Brasil adapte modelos bem-sucedidos à sua realidade, considerando aspectos regulatórios, ambientais e socioeconômicos. A integração entre universidades, governo e empresas, observada em diferentes regiões chinesas, inspira o fortalecimento de ecossistemas nacionais de inovação.

Como reflexo direto da missão, foram propostos projetos prioritários, que se alinham às necessidades de empresas do setor energético, como a “CTG Brasil”, e têm potencial para alavancar o posicionamento do país em tecnologias sustentáveis.

Recomenda-se que próximas mobilidades contemplem desde o planejamento inicial o apoio de agências de assessoria e câmaras de comércio bilaterais, que se mostraram essenciais para viabilizar contatos estratégicos na China. O uso de ferramentas locais de comunicação, como o WeChat, deve ser incorporado já nas etapas preliminares, assim como a elaboração de cartas de apresentação bilíngues (inglês/mandarim), que facilitaram a abertura de agendas institucionais. Ademais, reforça-se a importância de envolver universidades brasileiras com histórico de cooperação internacional, fortalecendo a ponte com ICTs estrangeiras e maximizando o impacto das parcerias.

Por fim, a missão consolidou o reconhecimento do Brasil como parceiro estratégico no cenário internacional, evidenciado pela recepção positiva das instituições chinesas e a disposição mútua para cooperação de longo prazo. A construção de uma rede de contatos técnicos e acadêmicos sólida amplia horizontes para novas parcerias, mobilidade de pesquisadores e desenvolvimento conjunto de soluções para os desafios globais da energia e da sustentabilidade.

A expectativa é que, a partir dessa experiência, se fortaleçam os laços institucionais entre Brasil e China e que novas missões, projetos e intercâmbios possam ser viabilizados, ampliando o impacto dessa mobilidade para o ecossistema brasileiro de inovação e a transição energética justa e inclusiva.

AGRADECIMENTOS

A realização desta missão técnica à China só foi possível graças ao apoio institucional e estratégico de diversas organizações. Agradecemos ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e à “CTG Brasil”, pelo lançamento do I Edital CTG-SENAI de Mobilidade Internacional 2024, que viabilizou esta importante iniciativa no âmbito do Programa de Mobilidade Internacional dos Institutos SENAI de Inovação (Rede ISI), coordenado pela Superintendência de Relações Internacionais (SRI), em alinhamento com as diretrizes da Superintendência de Tecnologia e Inovação (SITEC) do SENAI-Departamento Nacional.

Agradecemos também às instituições chinesas que nos acolheram ao longo da missão, demonstrando abertura para cooperação técnico-científica, e ao Consulado-Geral do Brasil em Xangai e Pequim pelo apoio diplomático e institucional que contribuiu significativamente para a viabilização dos encontros e visitas.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. Hidrogênio verde e energia solar no Brasil: perspectivas e potenciais. São Paulo: ABSOLAR, 2024.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Relatório de investimentos em P&D e eficiência energética. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 06 jun. 2025.

BIRKEMOSE, J. B. et al. Drone-based blade inspection in offshore wind farms: a comparative study. *Renewable Energy*, v. 174, p. 531–544, 2021.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Painel de licenciamento ambiental: empreendimentos de energia eólica

offshore. Brasília: IBAMA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama>. Acesso em: 06 jun. 2025.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Propostas de empreendimentos de geração eólica offshore. Brasília: IBAMA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama>. Acesso em: 10 mar. 2025.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Transição energética e inovação no Brasil: diagnóstico e propostas. Brasília: CGEE, 2022.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Agenda da indústria para a inovação. Brasília: CNI, 2021.

DAMMANN, S. et al. Structural health monitoring of wind turbine blades using embedded sensor networks. *Wind Energy Science*, v. 8, p. 345–362, 2023.

DNV. Offshore wind operation and maintenance cost reduction strategies. Oslo: DNV, 2023.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano indicativo de processos para geração offshore. Brasília: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 06 jun. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Rota estratégica para o hidrogênio de baixo carbono no Brasil. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

FENG, Y. et al. Digital twin-driven condition monitoring for offshore wind turbines: framework and application. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 11, n. 6, 2019.

FERREIRA, A. B. et al. Assessment of offshore wind energy potential in Brazil using satellite data. *Renewable Energy*, v. 147, p. 1165–1176, 2020.

FIERN. Primeira licença Brasil para projeto de energia eólica offshore é concedida ao SENAI-RN. 2023. Disponível em: <https://www.fiern.org.br/primeira-licenca-brasil-para-projeto-de-energia-eolica-offshore-e-concedida-ao-senai-rn/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

GWEC – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global offshore wind report 2024. Brussels: GWEC, 2024.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Offshore wind and hydrogen: towards a decarbonised energy system. Paris: IEA, 2022.

IEA WIND TASK 32. Floating LiDAR for offshore wind resource assessment: state of the art. Paris: IEA Wind, 2023.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Transição energética e o papel do hidrogênio verde no Brasil. Brasília: IPEA, 2023.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: part III. Abu Dhabi: IRENA, 2023.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable capacity statistics 2023. Abu Dhabi: IRENA, 2023.

MORAES, D. A. C. et al. Modelagem atmosférica de recursos eólicos offshore no litoral brasileiro com o WRF. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 37, n. 1, p. 45–58, 2022.

NASCIMENTO, W. A.; OLIVEIRA, T. L.; ALMEIDA, D. R. Estudo de viabilidade técnico-energética da combinação de turbinas eólicas offshore com painéis solares na região Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 11, n. 4, p. 155–169, 2022. DOI: 10.5380/rber.v11i4.88888.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. University-industry collaboration in R&D and innovation: best practices. Paris: OECD Publishing, 2022.

SENAI. Relatório final da missão técnica à China – Mobilidade Internacional SENAI/CTG Brasil. Brasília: Departamento Nacional do SENAI, 2024. (Documento interno, não publicado).

VINHOZA, T. T. A. et al. Análise do potencial técnico de geração de energia eólica offshore no Brasil. Revista Brasileira de Energia, v. 29, n. 2, p. 53–67, 2023.

VINHOZA, T. T.; PEREIRA, A. J.; COSTA, L. C. Potencial eólico offshore no Brasil: desafios e oportunidades para a transição energética. Revista Brasileira de Energia, v. 29, n. 1, p. 49–66, 2023.

O potencial eólico no estado do Rio Grande do Sul sob o ponto de vista do licenciamento ambiental

Paula Rodrigues Tavares¹, Rosaura Heurich², Manoel Eduardo de Miranda Marcos³, Luciano Paschoaloti Messa⁴, Pamella Monteiro Nunes⁵

Divisão de Energia - FEPAM

paula-tavares@fepam.rs.gov.br, rosaura-heurich@fepam.rs.gov.br, manoel-marcos@fepam.rs.gov.br, luciano-messa@fepam.rs.gov.br, e_pamella-nunes@fepam.rs.gov.br

RESUMO

A energia eólica tem apresentado crescimento constante como alternativa para atender à crescente demanda energética gerada pelas atividades humanas. O estado do Rio Grande do Sul desempenha um papel relevante no cenário energético brasileiro, e pesquisas nessa área são fundamentais para gerar dados precisos sobre o desenvolvimento da energia eólica. Este estudo avaliou a capacidade de geração eólica no estado com base em dados públicos e registros de licenciamento ambiental. Os resultados indicam que cerca de 15% da energia elétrica atualmente produzida no estado é proveniente de fontes eólicas. Além disso, com base nas licenças ambientais já emitidas, estima-se um potencial de geração em torno de 17 GW. Esses achados reforçam a posição estratégica do Rio Grande do Sul na matriz elétrica nacional.

Palavras-chaves: energia eólica; Rio Grande do Sul; matriz energética; licenciamento ambiental.

ABSTRACT

Wind energy has seen steady growth as a means to meet rising energy demands driven by human activity. Rio Grande do Sul plays a major role in Brazil's energy landscape, and research in this area is key to generating accurate data on wind power development. This study evaluated wind energy capacity in the state using public data and environmental licensing records. Results show that about 15% of the state's current electrical energy output comes from wind sources. Additionally, based on approved licenses, wind generation potential is estimated at around 17 GW. These findings underscore Rio Grande do Sul's strategic position in Brazil's national electrical energy mix.

Keywords: wind energy; Rio Grande do Sul; electrical matrix; environmental licensing.

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento eólico vem sendo utilizado pela humanidade há milênios, inicialmente para moagem de grãos e bombeamento de água. Moinhos de vento se encontravam espalhados pelos continentes do velho mundo desde 200 a.C, porém, apenas em 1976 a primeira turbina eólica comercial, também chamada de aerogerador, cuja função é gerar energia elétrica por meio dos ventos, foi ligada à rede elétrica, na Dinamarca (SOVERNIGO, 2009).

¹ Bióloga – DIGEN/FEPAM

² Bióloga – Chefe - DIGEN/FEPAM

³ Arquiteto – DIGEN/FEPAM

⁴ Biólogo – DIGEN/FEPAM

⁵ Estagiária Geografia – DIGEN/FEPAM

A evolução da tecnologia que vem ocorrendo nas últimas décadas demanda um incremento na necessidade de energia e, com isso, têm sido buscadas novas maneiras de geração de energia com o objetivo de aliar eficácia energética e sustentabilidade ambiental. Nesta seara, a geração de energia a partir de fonte eólica vem se tornando uma das formas de obtenção energética atualmente difundida de forma a associar uma eficiente produtividade com baixos impactos ambientais.

A energia eólica é considerada uma forma alternativa de geração de eletricidade por uma fonte renovável, o vento e é gerada através da conversão da energia cinética contida nas massas de ar em movimento em eletricidade por meio de turbinas denominadas aerogeradores. (PACHECO & SANTOS, 2012).

O aumento na utilização de energia pelas atividades humanas coincide, também, com uma maior consciência ambiental, de forma que vem se buscando formas mais sustentáveis ambientalmente de geração energética. Assim, normativas ambientais sobre o tema foram e seguem sendo construídas. A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 01 datada de 1986 dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental, na qual constam, entre as atividades abarcadas por esta, as Usinas de geração de eletricidade, qualquer que seja a fonte de energia primária. (BRASIL, 1986)

No Brasil, a capacidade instalada de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica era de 32.822 MW em 2024, uma expansão de 4.240 MW neste ano. Quando nos referimos a geração verificada, dos 687.692 GWh gerados em 2024, 105.145 GWh foram através de fonte eólica, ou seja, 15,3% da geração total apurada no Brasil no período (BRASIL, 2024).

O estado do Rio Grande do Sul, em virtude de suas características geográficas, é considerado de importante potencialidade para o aproveitamento eólico. Além da potencialidade eólica, medida pela velocidade dos ventos, outro fator importante para o crescimento desta atividade no Brasil e no Rio Grande do Sul diz respeito aos custos atrativos da geração de energia eólica (LAYTON, 2009).

O objetivo deste estudo é verificar a capacidade de geração de energia eólica do estado do Rio Grande do Sul no que se refere aos licenciamentos ambientais emitidos pelo órgão estadual (FEPAM) para empreendimentos de geração de energia a partir de fonte eólica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: A PARTICIPAÇÃO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL NA MATRIZ ENERGÉTICA A PARTIR DE FONTE EÓLICA E AS NORMATIVAS AMBIENTAIS VIGENTES

2.1 O estado do Rio Grande do Sul e a produção eólica

A participação da produção de energia elétrica no estado do Rio Grande do Sul a partir de fonte eólica vem aumentando durante os últimos anos tendo representado, em 2023, 15,5% (5.288 GWh) de toda energia gerada no estado (34.141 GWh). Se avaliarmos o contexto nacional, o estado produz 5,5% da energia eólica produzida no país. (EPE, 2024)

O primeiro empreendimento eólico no Rio Grande do Sul, localizado no município de Osório/RS teve o início da sua operação no ano de 2006, composto, à época, por três parques com 75 aerogeradores cada. Assim, podemos considerar que a atividade começou a ser desenvolvida no Estado recentemente, o que demanda esforços em busca da compreensão quanto aos efeitos advindos dessa tecnologia de geração de energia. (BIER, 2016)

Atualmente existem no estado 33 empreendimentos eólicos em operação que somam uma potência instalada de 1741,29 MW. Esses empreendimentos estão localizados em nove municípios gaúchos, os quais: Osório, Xangri-lá, Santa Vitória do Palmar, Viamão, Chuí, Rio Grande, Tramandaí, Palmares do Sul e Santana do Livramento.

Ainda, no que tange ao licenciamento ambiental, de acordo com dados de abril de 2025, há 68 licenças emitidas em diversas fases de concepção dos empreendimentos.

2.2 Normas ambientais estaduais

A Portaria FEPAM nº 118, publicada em 2014, a partir de estudos dos técnicos de diversos setores da comunidade, bem como, com assessoria de consultoria técnica contratada para a sua elaboração, normatizava os ritos padrões do licenciamento eólico no Estado (RAS – Relatório Ambiental Simplificado ou EIA/RIMA – Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental),

3. MÉTODO DO ESTUDO

A metodologia para a construção deste estudo consistiu em pesquisa bibliográfica referente aos dados relativos à matriz energética brasileira, bem como, a participação do estado do Rio Grande do Sul nesta.

Com base nos dados obtidos, justifica-se a importância de se obter um panorama do licenciamento ambiental no estado. Assim, foram levantados os dados referentes às licenças ambientais emitidas no estado a partir de mapeamento disponibilizado ao público através do site da FEPAM, bem como, pesquisa no banco de dados da fundação em busca do detalhamento destes documentos. A data de corte analisada foi abril de 2025, em virtude da variação constante destes dados, seja por licenças que são emitidas, ou por processos novos que possam ter vindo a ser protocolados. (FEPAM, 2025)

A construção destes dados publicizados através do site da FEPAM foi realizada pelo setor responsável pelo geoprocessamento da fundação – SIG FEPAM – e são de extrema importância na avaliação das atividades eólicas no estado.

A partir da obtenção dos dados, estes foram planilhados e analisados quanto a localização dos empreendimentos, potência prevista/instalada, bem como fase em que estes parques eólicos se encontram no que se refere à autorização ambiental emitida, se em planejamento (DTREIA e LP), instalação (LI) ou em operação (LO), e ainda, se em tramitação ou com licença ambiental emitida.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De acordo com a Tabela 1, podemos verificar que no estado há 8 DTREIAS emitidos, que ao somar 3757,5 MW de potência prevista, viabilizam os estudos para a solicitação de Licença Prévia através de EIA/RIMA. Ainda, 18 licenças prévias (LP, LPA e LPER) emitidas pelo órgão estadual (FEPAM), demonstram a viabilidade da área escolhida por estes empreendimentos para a maturação dos estudos de quase 5 GW (Tabela 2).

Tipo de licença	Nome do empreendimento	Potência (MW)	Região eólica
DTREIA	Complexo Eólico WP Rio Brande	675	Litoral Sul
DTREIA	Complexo Eólico Cruzeiro do Sul	357	Costa Leste da Laguna (Litoral Norte)
DTREIA	Parque Eólico Forte dos Ventos	300	Campanha
DTREIA	Complexo Eólico Vitoriense	270	Litoral Sul
DTREIA	Complexo Eólico Ventos De Uruguaiana	295	Campanha
DTREIA	Complexo Eólico Serra do Rio Negro	252	Campanha
DTREIA	Complexo Eólico Eol Harmonia.	56	Centro Leste
DTREIA	Complexo Eólico Caminho dos Ventos	1552,5	Coxilha de Santana (Campanha)
POTÊNCIA TOTAL - COM DTREIA EMITIDA		3757,5	MW

Tabela 1 – Empreendimentos com Declaração de termo de referência para EIA/RIMA (DTREIA) emitidas pela FEPAM no estado do Rio Grande do Sul.

Tipo de licença	Nome do empreendimento	Potência (MW)	Região eólica
LP	Parque Eólico Giruá	29,4	Campanha
LPA	Central Geradora Eólica Povo Novo	29,4	Litoral Sul
LPER	Complexo Eólico São José dos Ausentes	346,5	Serra Gaúcha
LP	Complexo Eólico Guajuvira	181,5	Região Central
LP	Complexo Eólico São Jerônimo	280,5	Campanha e região central
LP	Complexo Eólico Eldorado	88	Escudo (Sul)

LP	CGE Harmonia	643,5	Coxilha de Santana (Campanha)
LP	Complexo Eólico Pinheiro Machado	435	Escudo (Sul)
LP	Complexo Eólico Quaraí	430	Coxilha de Santana (Campanha)
LP	Parque Eólico Rota dos Ventos	162	Campanha (Sul)
LP	Complexo Geração Eólica In Ventus	247,5	Litoral Sul
LP	Complexo Eólico Serra dos Antunes	241,8	Escudo (Sul)
LP	Complexo Eólico Canelões	514,6	Litoral Sul
LP	Parque Eólico Pejuçara	281,4	Região Noroeste
LP	CGE Carumbé	295,8	Campanha
LP	Complexo Eólico Nova Vitória	210	Litoral Sul
LP	Complexo Eólico Luz Da Vitória	197,4	Litoral Sul
LP	Complexo Eólico São Miguel	319,5	Litoral Sul
POTÊNCIA TOTAL - COM LP EMITIDA		4933,8	MW

Tabela 2 - Empreendimentos com licenças prévia (LP, LPA e LPER) emitidas pela FEPAM no estado do Rio Grande do Sul.

No que se refere a empreendimentos com Licença de Instalação (LI) emitida, ou seja, autorizados a iniciarem as obras dos parques eólicos, há viabilidade de instalação de 1969,22 MW através das 10 licenças (Tabela 3), as quais, nas regiões eólicas Costa Leste da Laguna, Costa Norte da Laguna, Campanha, Escudo, Litoral Norte, Costa Oeste da Laguna, Litoral Sul e Coxilha de Santana.

Este dado demonstra, de forma direta, o potencial de novos empreendimentos no estado. De acordo com as licenças ambientais emitidas pela FEPAM, cerca de 2 GW poderiam já estar em instalação, no que se refere as questões ambientais.

Tipo de licença	Nome do empreendimento	Potência (MW)	Região eólica
LI	Complexo Eólico Vigia	200	Costa Leste da Laguna
LI	Parque Eólico do Pontal	200	Costa Norte da Laguna
LI	Central Geradora Eólica Santa Tecla	43,2	Campanha
LI	Complexo Eólico Pedras Altas	252	Escudo
LI	Central Geradora Eólica Chico Loma	94,52	Litoral Norte
LI	Complexo Eólico Pinheiro Machado	189	Escudo
LI	Complexo Eólico Capão Alto	239	Costa Oeste da Laguna
LI	Complexo Eólico Província dos Ventos	99	Campanha
LI	Complexo Eólico Gran Sul	252	Litoral Sul
LI	Complexo Eólico Três Divisas	400,5	Coxilha de Santana (Campanha)
POTÊNCIA TOTAL - COM LI EMITIDA		1969,22	MW

Tabela 3 - Empreendimentos com licenças de instalação (LI) emitidas pela FEPAM no estado do Rio Grande do Sul.

Em operação no estado, em abril de 2025, havia 33 Licenças de Operação emitidas para empreendimentos de geração eólica, as quais, somando 1741,29 MW de potência instalada no estado. (Tabela 4). Nesta tabela foi considerado o Parque Eólico Tramandaí que, embora estivesse em tramitação e solicitação de renovação da LO na data corte utilizada neste estudo, foi considerada como parque em operação e incluída na Tabela 4 para fins de somatório da potência instalada no estado visto encontrar-se em plena operação.

Tipo de licença	Nome do empreendimento	Potência (MW)	Região eólica
LO	Aproveitamento Eólico Integral de Osório	150	Litoral Norte
LO	CGE Xangri-Lá	31,7	Litoral Norte
LO	Complexo Eólico Cerro Chato	138	Coxilha de Santana
LO	Complexo Eólico Geribatú	258	Litoral Sul
LO	Complexo Eólico Atlântica	120	Costa Leste da Laguna
LO	Parque Eólico Pontal II A	21,6	Costa Leste da Laguna
LO	Complexo Eólico Corredor dos Senandes	108	Litoral Sul
LO	Parque Eólico Ibirapuitã I	25,2	Coxilha de Santana
LO	Parque Eólico Pontal III B	27	Costa Norte da Laguna
LO	Parque Eólico Pontal II B	11,2	Costa Norte da Laguna
LO	Parque Eólico Sangradouro 2 E 3	57,5	Litoral Norte
LO	Complexo Eólico Palmares	57,5	Costa Leste da Laguna
LO	Parque Eólico Osório II E III	57,5	Litoral norte
LO	Parque Eólico dos Índios 2	52,9	Litoral Norte
LO	Central Geradora Eólica Cassino II	20	Litoral Sul
LO	Central Geradora Eólica Cassino I	22	Litoral Sul
LO	Central Geradora Eólica Cassino III	22	Litoral Sul
LO	Complexo Eólico Chuí	98	Litoral Sul
LO	Complexo Eólico Chuí - CGE Chuí 9	23,3	Litoral Sul
LO	Complexo Eólico Hermenegildo I	162,89	Litoral Sul
LO	CGE Aura Mangueira VII	24	Litoral Sul
LO	CGE Aura Mangueira XI	9	Litoral Sul
LO	CGE Aura Mirim IV	15	Litoral Sul
LO	CGE Aura Mirim II	30	Litoral Sul
LO	CGE Aura Mangueira XIII	15	Litoral Sul
LO	CGE Aura Mangueira XV	18	Litoral Sul
LO	CGE Aura Mangueira XII	15	Litoral Sul
LO	CGE Aura Mirim VIII	9	Litoral Sul
LO	CGE Aura Mirim VI	9	Litoral Sul
LO	CGE Aura Mangueira IV	21	Litoral Sul
LO	CGH Mangueira XVII	15	Litoral Sul
LO	CGE Aura Mangueira VI	27	Litoral Sul
LO6	Parque Eólico Tramandaí	70	Litoral Norte
POTÊNCIA TOTAL - EM OPERAÇÃO		1741,29	MW

Tabela 4 – Empreendimentos em operação no estado do Rio Grande do Sul, com licenças de operação (LO) emitidas pela FEPAM.

Importante ressaltar, também, que há no estado, 4,7 GW de empreendimentos com processos de licenciamento ambiental em tramitação no órgão ambiental em diversas fases licenciatórias, conforme demonstra a Tabela 5. Assim, verificamos a potencialidade da atividade no estado, o qual recebe processos de licenciamento ambiental para as diversas fases, mensalmente.

⁶ O Parque Eólico Tramandaí, embora se encontrasse, em abril de 2025, com processo em tramitação, foi incluído nesta tabela por se tratar de solicitação de renovação de LO de empreendimento já em operação.

Tipo de licença	Nome do empreendimento	Potência (MW)	Região eólica
LIER	Complexo Eólico Ventos do Atlântico	870	Costa Leste da Laguna
LP	CGE Imbaa	498,8	Sem classificação
LI	Complexo Eólico Electra Ventos do Sul	120	Litoral Sul
LI	Complexo Eólico Pinheiro Machado Norte	120	Escudo
DTREIA	Complexo Eólico Farroupilha	300	Costa Norte da Laguna
LPA	Central Geradora Eólica Pedreira	291,06	Campanha
LP	Complexo Eólico Pampeiro	250	Coxilha de Santana
LPER	Complexo Eólico Santa Helena de Quaraí	414	Coxilha de Santana
LPER	Complexo Eólico Minuano do Ibirocaí	1170	Sem classificação
LP	CE Camoati	296,4	Sem classificação
LP	Complexo Eólico Torquato	405	Campanha
POTÊNCIA TOTAL EM TRAMITAÇÃO⁷		4735,26	MW

Tabela 5 - Empreendimentos com solicitações de licença em tramitação na FEPAM no estado do Rio Grande do Sul.

No estado, conforme verificado nos mapas apresentados nas Figuras 3 e 5, grande parte dos empreendimentos em operação estão localizados nas regiões litoral sul e litoral norte. Quando analisamos os empreendimentos com viabilidade de instalação, ou seja, com LI emitida, observamos uma maior dispersão destes, o que demonstra a crescente importância do estado para o setor eólico, proveniente do potencial de ventos da região.

⁷ Nesta tabela, o empreendimento Parque Eólico Tramandaí, embora estivesse com processo em tramitação em abril de 2025, foi excluída dos processos em tramitação por se tratar de parque eólico em operação de forma que a potência deste já está contabilizada na tabela referente aos empreendimentos em operação (Tabela 4).

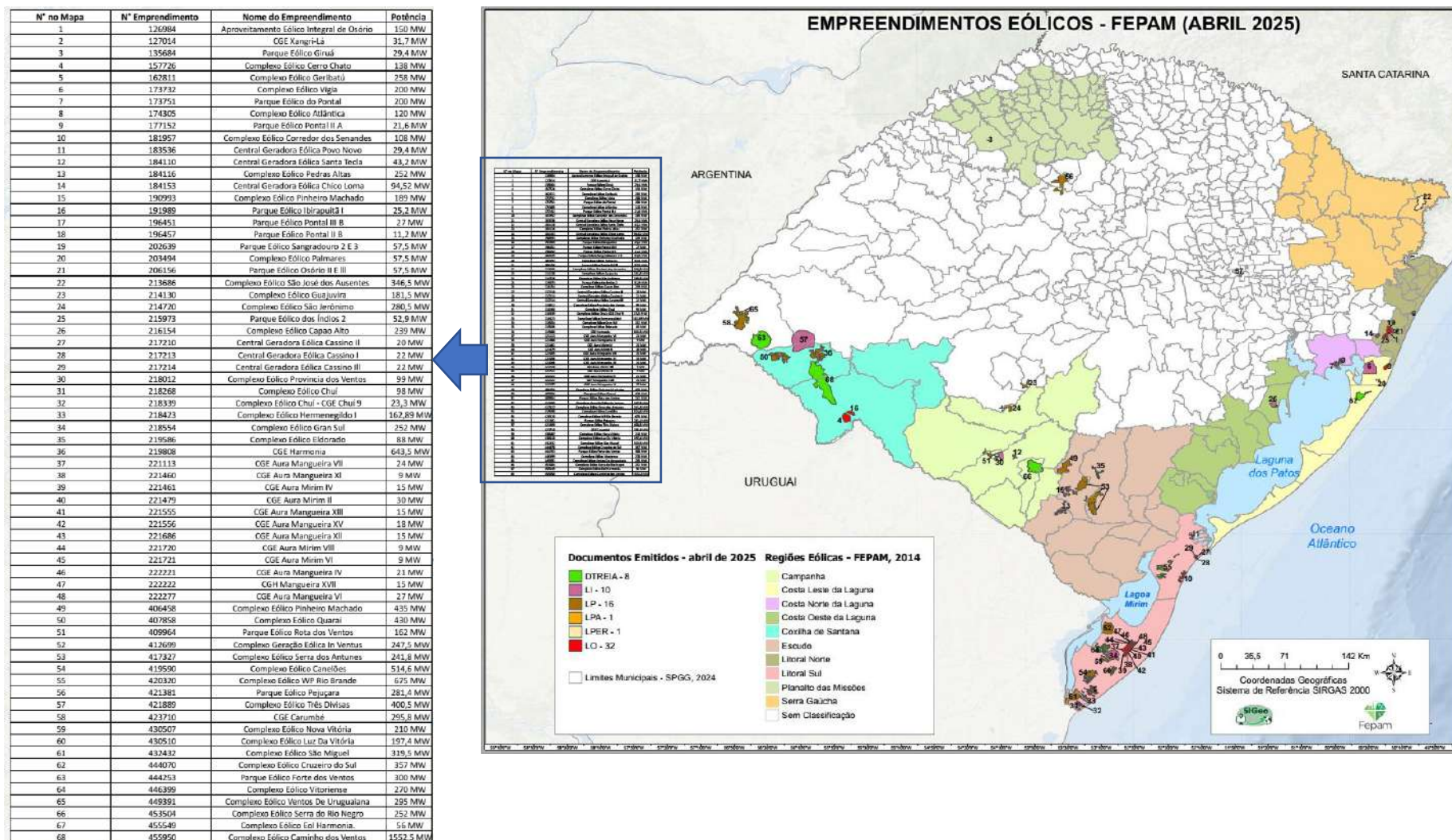


Figura 3 – Empreendimentos eólicos com licenças emitidas (DTREIA, LP, LPA, LPER, LI e LO) pela FEPAM no estado do Rio Grande do Sul em abril de 2025. Fonte: Adaptado de FEPAM 2025

Na Figura 4, observamos que a tendência de maior dispersão destes empreendimentos vem se demonstrando ao verificarmos os processos em tramitação junto à FEPAM, distribuídos em 7 regiões eólicas além dos empreendimentos solicitados em áreas não abrangidas pelo zoneamento eólico disponível para o estado.

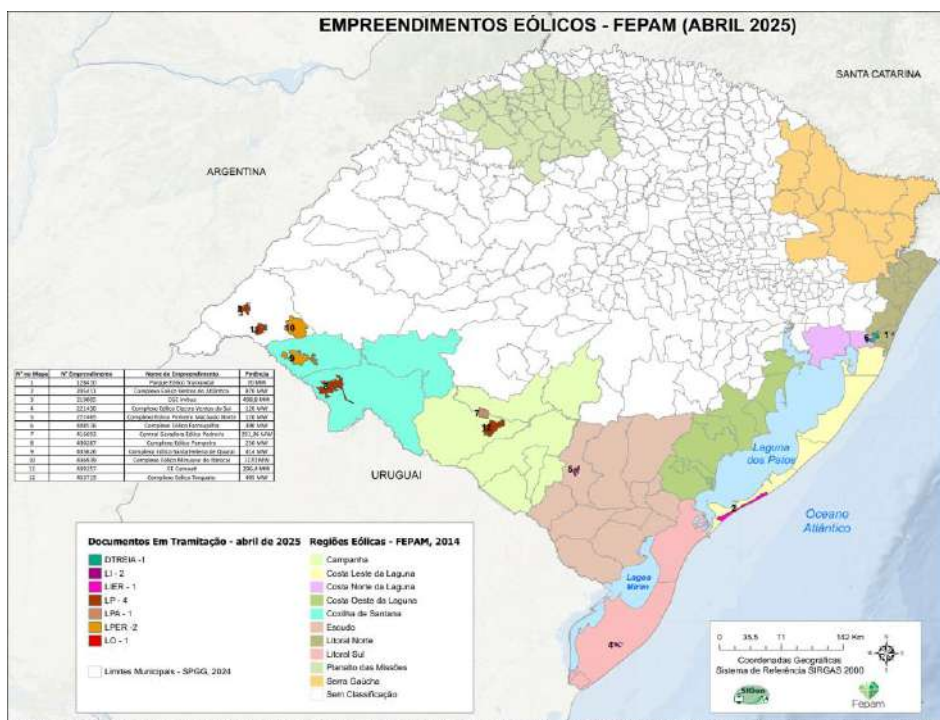


Figura 4 – Empreendimentos eólicos com solicitação de licença ambiental em tramitação na FEPAM no estado do Rio Grande do Sul em abril de 2025. Fonte: FEPAM 2025

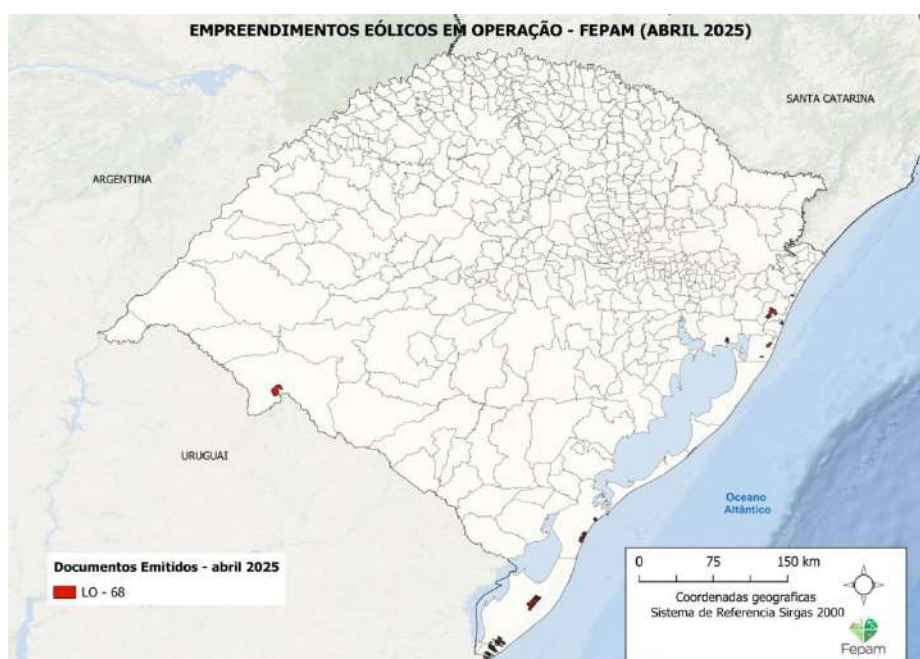


Figura 5 – Empreendimentos eólicos em operação no estado do Rio Grande do Sul em abril de 2025. Fonte: elaborado pela Divisão de Energia - DIGEN

Ainda, podemos inferir quanto à infraestrutura do Rio Grande do Sul, que conta com os portos públicos de Rio Grande, Pelotas e Porto Alegre, além de 17 terminais de uso privado, interligados por mais de 754 km de vias navegáveis, bem como uma malha rodoviária considerável, que torna viável o avanço de obras no estado. (PORTOS RS, 2025)

A partir dos dados relativos aos licenciamentos ambientais em tramitação e emitidos no estado do Rio Grande do Sul, podemos verificar a importância do estado na geração de energia eólica através da viabilidade ambiental de cerca de 17 GW, em alguma fase de licenciamento ambiental. Destes, quase 2 GW ainda não se encontram instalados, apesar de já se encontrarem com viabilidade ambiental para construção.

Ao analisarmos o histórico do estado no que se refere à instalação de empreendimentos eólicos, bem como as licenças emitidas pelo órgão ambiental, verificamos a potencialidade para a atividade econômica no Rio Grande do Sul, de forma que há ainda perspectiva dos setores envolvidos na aquisição de novos projetos, bem como, na efetiva instalação e empreendimentos eólicos de maior maturidade quanto a licenças ambientais vigentes.

Cabe ressaltar que a FEPAM, ao analisar as solicitações de licenciamento ambiental protocoladas, preza pela técnica e pela observância de normas e legislações, de forma a sempre buscar a sustentabilidade ambiental dos projetos que avalia. Isso é demonstrado pelas portarias e resoluções, além, de procedimentos internos, vigentes, que buscam a qualificação do trabalho técnico executado pelo órgão além de tornar transparente as decisões e os ritos a serem seguidos. Ainda, através do setor responsável pelo geoprocessamento da FEPAM – SIG FEPAM - os dados do setor eólico, bem como de outras atividades econômicas, são constantemente compilados e disponibilizados ao público, o que demonstra a eficácia do setor e culmina na publicidade do licenciamento ambiental no estado.

Concluímos, neste trabalho, sobre a importância do estado do Rio Grande do Sul para a geração de energia a partir de fonte eólica, visto o quantitativo de licenças ambientais vigentes para a atividade em diversas fases do licenciamento. Os dados e resultados aqui aferidos demonstram a viabilidade e potencialidade para o maior desenvolvimento desta atividade no estado.

REFERÊNCIAS

BIER, L. L. Estudo da paisagem: percepções sobre o complexo eólico de Osório/RS. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/158110/001020922.pdf?sequence=1>. Acesso em 16 de julho de 2025.

BRASIL. Resolução CONAMA n.001, de 23 de jan. de 1986. Brasília, DF, jan. 1986.

BRASIL. Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico - Consolidação-2024. Acessado em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-nacional-energia-eletrica/publicacoes/boletim-anual-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/consolidacao-2024/boletim-especial-consolidacao-2024_snee-ddos-vfinal.pdf/view. Acesso em 06 de julho de 2025.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2024. Brazilian Energy Balance 2024 Year 2023 / Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2024. 274 p. : 182 ill. : 23 cm

FEPAM. Portaria FEPAM 118/2014. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler – RS. Disponível em <<http://www.fepam.rs.gov.br/LICENCIAMENTO/AREA4/pch-cgh-eolica.asp>> Acesso em 15 de julho de 2025.

FEPAM. Arquivos Geoespaciais - Empreendimentos de Energia Eólica. Disponível em <<https://www.fepam.rs.gov.br/energia-eolica>> Acesso em 10 de julho de 2025.

LAYTON, J. Como funciona a energia eólica. Como Tudo Funciona. 2009. Disponível em: <<http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica2.htm>>. Acesso em: 10 de julho de 2025.

PACHECO, C. S. G. R. e SANTOS, R. P. Parques Eólicos e Transformações Espaciais: uma Análise dos Impactos Socioambientais na Região de Sento Sé/BA. Revista Brasileira de Geografia Física. Vol. 05, p.1243-1258, 2012.

PORTOS RS. Quem somos. Disponível em https://www.portosrs.com.br/site/comunidade_portuaria/quem_somos. Acesso em 18/07/2025.

RIO GRANDE DO SUL. Resolução CONSEMA nº 433, de 12 de nov. de 2020 de 2020. Porto Alegre, RS, nov. 2020.

SOVERNIGO, M. H. Impacto dos aerogeradores sobre a avifauna e quiropteroфаuna do Brasil. 2009. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Biológicas – bacharelado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2009.

Evaluación del impacto del preprocesamiento de datos en los modelos de curva de potencia de aerogeneradores en un parque eólico

Pablo Volpe¹, Priscila Silveira², Franciele Weschenfelder³

1,2 y 3 Universidad Tecnológica del Uruguay

pablo.volpe@utec.edu.uy, priscila.silveira@utec.edu.uy,
franciele.weschenfelder@utec.edu.uy

RESUMEN

Este estudio analiza el impacto de la calidad de los datos en la modelación de las curvas de potencia de aerogeneradores en un parque eólico. Se utilizan datos SCADA de ocho aerogeneradores, aplicando una metodología de limpieza y clasificación de datos basada en normas internacionales (IEC 61400-12-1 y 12-2) y literatura reciente. Se comparan dos tipos de conjuntos de datos: datos crudos (con pre-filtrado básico) y datos filtrados (con un tratamiento integral de calidad), evaluando su efecto en la generación de curvas de potencia mediante modelos por intervalos, modelos paramétricos (5PL) y modelos no paramétricos (ANN y XGBoost). El desempeño de los modelos se evalúa utilizando métricas como RMSE y R^2 , junto con la inspección visual de las curvas de potencia. El análisis se centra en cómo el preprocesamiento de los datos influye en la precisión de los modelos, particularmente en los métodos de curvas por intervalos y logísticas. El estudio concluye que la calidad de los datos es un factor clave para obtener evaluaciones confiables del rendimiento energético de los aerogeneradores.

Palabras-clave: Energía eólica; modelación de curvas de potencia; preprocesamiento de datos; calidad de los datos.

ABSTRACT

This study analyzes the impact of data quality on the modeling of wind turbine power curves in a wind farm. SCADA data from eight wind turbines are used, applying a data cleaning and classification methodology based on international standards (IEC 61400-12-1 and 12-2) and recent literature. Two types of datasets are compared: raw data (with basic pre-filtering) and filtered data (with comprehensive quality treatment), evaluating their effect on the generation of power curves using binned models, parametric models (5PL), and non-parametric models (ANN and XGBoost). Model performance is assessed using metrics such as RMSE and R^2 , along with visual inspection of the power curves. The analysis focuses on how data preprocessing influences model accuracy, particularly in binned and logistic curve methods. The study concludes that data quality is a key factor for reliable assessments of wind turbine energy performance.

Keywords: Wind energy; power curve modeling; data pre-processing; data quality.

1 INTRODUCCIÓN

Durante la última década, la energía eólica ha tenido un crecimiento significativo en Uruguay, consolidándose como un componente fundamental del sistema eléctrico nacional. Para 2023, la capacidad instalada superó los 1500 MW distribuidos en 43 generadores eólicos y representando el 37 % de la generación eléctrica anual, unos 4764.8 GWh (BEN, 2023). Esta gran participación refleja la importancia de la eólica en el sistema eléctrico uruguayo, por lo cual comprender y optimizar el rendimiento de los aerogeneradores es de gran interés. Además la variabilidad inherente al recurso eólico junto con el gran porcentaje de eólica en la matriz de insumos para la generación de energía eléctrica plantea desafíos a los operadores del sistema eléctrico (GARCÉS-RUIZ; GONZÁLEZ; GIRALDO, 2023).

Durante la operación de los parques eólicos se generan grandes volúmenes de datos relacionados

con variables meteorológicas, la generación, el control y la operación de los aerogeneradores, estas son usualmente almacenados en intervalos de diez minutos, por lo que al relacionar la resolución temporal, la cantidad de variables por aerogenerador y la el número de aerogeneradores en un parque eólico se obtienen conjuntos de datos de gran tamaño. El análisis eficiente de esta información requiere de herramientas y habilidades que permitan extraer conocimiento útil para mejorar la producción energética, en este contexto, la programación, y en particular el lenguaje Python, se ha consolidado como una herramienta clave por su versatilidad y amplio soporte comunitario (AYER, 2014; Python Software Foundation, 2024; Stack Overflow, 2024).

Para obtener resultados confiables la calidad de los datos es un aspecto fundamental en cualquier análisis, ya que influye directamente en la fiabilidad de los resultados, suele utilizarse el termino *GIGO*, *Garbage In, Garbage Out* (OZMINKOWSKI, 2021) el cual alude a la importancia de los procedimientos de calidad aplicado a los datos. En este trabajo, se emplean herramientas de software libre para el filtrado basado en recomendaciones y análisis de datos de un parque eólico. La metodología de calidad utilizada se basa en recomendaciones propuestas por (WANDERLEY, 2015), (WMO, 2021), (UNE-EN 61400-12-1, 2018) y (YANG et al., 2025). Se evaluaron distintos modelos de curvas de potencia utilizados en la literatura referente a la temática ((SOHONI; GUPTA; NEMA, 2016), (JING et al., 2021)) utilizando como base los conjuntos de datos sin y con la metodología de calidad aplicada. Por ultimo se estudio el efecto del tratamiento de calidad en las métricas de desempeño obtenidas para cada caso.

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Modelos para curva de potencia

Al evaluar el desempeño energético un aerogeneradores es de gran importancia contar con una expresión que relacione la variable de velocidad del viento a la altura de buje con la potencia eléctrica generada, dicha relación se conoce como curva de potencia. Para obtener el modelo matemático de la curva de potencia de un aerogenerador a partir de datos medidos existen diversas alternativas. El modelo por bins ((IEC 61400-12-2, 2022)) es un método discreto, simple y estandarizado, capaz de reflejar la no linealidad entre velocidad del viento y potencia e incorporar efectos adicionales mediante la normalización. Los modelos paramétricos suponen una forma predefinida (polinomios, modelos logísticas), destacando el modelo de curva logístico de cinco parámetros (5PL), ya que este se ajusta con precisión y captura el punto de inflexión. En contraste, los modelos no paramétricos no imponen una relación fija y pueden integrar múltiples variables, aunque requieren grandes volúmenes de datos. Entre estos modelos se encuentran las redes neuronales artificiales (RNA), modelos de Clustering, entre otros ((SOHONI; GUPTA; NEMA, 2016)).

2.1.1 Método de los bins para el cálculo de curva de potencia

El método de los bins es un método discreto, en el cual se agrupan los datos de potencia y velocidad del viento normalizada¹ en bins, utilizando como referencia para dicha agrupación a la velocidad del viento normalizada. La ((IEC 61400-12-2, 2022)) establece una división con un paso de bin de 0.5 m/s en la velocidad de viento (bins centrados en múltiplos enteros del paso de bin). La separación inicia en la velocidad de arranque y finaliza en la velocidad de corte del aerogenerador. Para cumplir con los requerimientos de la ((IEC 61400-12-2, 2022)), se requiere una validación de la base de datos, los datos por bin deben considerar un mínimo de media hora de mediciones válidas. En el total de bins a evaluar se debe tener al menos 180 horas de mediciones válidas (de no ser así la ((IEC 61400-12-2, 2022)) plantea una curva de potencia extrapolada). Una vez obtenidos los bins de velocidad de viento se halla el promedio tanto de la velocidad como de la potencia en cada bin (Ecuación 1).

$$\begin{aligned} V_{avg,i} &= \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \\ P_{avg,i} &= \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde, $V_{avg,i}$ y $P_{avg,i}$ son respectivamente la velocidad del viento y la potencia normalizadas promedio en el bin i , N_i es el número de datos en el bin i , y $V_{n,i,j}$ y $P_{n,i,j}$ los valores normalizados de velocidad y potencia correspondientes al conjunto de datos j en el bin i .

¹La ((IEC 61400-12-2, 2022)) establece únicamente una normalización por densidad del aire para aerogeneradores con control activo de potencia, lo cual simplifica notoriamente la obtención de la curva de potencia respecto al procedimiento de la (UNE-EN 61400-12-1, 2018). No obstante, se requiere contar con la velocidad del viento en corriente libre, o en su defecto con la función de transferencia de la nacelle.

2.1.2 Método basado en curva logística de cinco parámetros (5PL)

Los modelos basados en la curva logística de cinco parámetros tienen la ventaja de tener la forma de una curva de potencia típica de un aerogenerador de velocidad variable, por ende si se llega a un buen ajuste de sus parámetros son una base interesante para evaluar la curva de potencia ((VILLANUEVA; FEIJÓ, 2018)). La Ecuación 2 muestra la forma base de las curvas logísticas, la diferencia entre los distintos modelos logísticos son los grados de libertad de la curva (parámetros).

$$P(v) = D + \frac{A - D}{(1 + (v/C)^B)^G} \quad (2)$$

Donde, $P(v)$ representa la potencia obtenida por el modelo para un valor de velocidad de viento v , A (asíntota mínima, valor más bajo alcanzado por la curva), B (pendiente de la curva), C (punto de inflexión), D (asíntota máxima, valor más alto que alcanza una curva) y G (factor de asimetría).

2.2 Métricas para evaluación de desempeño

Las métricas de evaluación son utilizadas para medir el rendimiento de un modelo, son de utilidad para evaluar que tan bien se ajusta un modelo a los datos, identificar errores y comparar diferentes modelos entre sí. Comúnmente suelen utilizarse el $RMSE$ (root mean square error) y el R^2 (coeficiente de determinación o bondad del ajuste), (Sohoni, Gupta e Nema (2016)). El $RMSE$ es ampliamente utilizado para evaluar la precisión de modelos de regresión. Con esta métrica se penaliza con mayor intensidad los errores grandes (debido al uso del cuadrado de las diferencias), lo que lo hace especialmente útil a la hora de priorizar la detección de desviaciones significativas. Además al tener las mismas unidades que la variables evaluadas se tiene una interpretación es directa de los resultados. El coeficiente de determinación R^2 es un parámetro estadístico que indica qué tan bueno es el ajuste, un valor de 0 indica un mal modelo (no explica la variabilidad de los datos reales), mientras que un valor de 1 indica un modelo perfecto (explicando la totalidad de la variabilidad de los datos reales). Las expresiones matemáticas para el $RMSE$ y R^2 se presentan en la Ecuación 3.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

Donde, n es el número total de observaciones, y_i son los valores reales, $\hat{y}_i$ los valores predichos por el modelo y $\bar{y}$ el promedio de los valores reales.

2.3 Calidad de datos para energía eólica

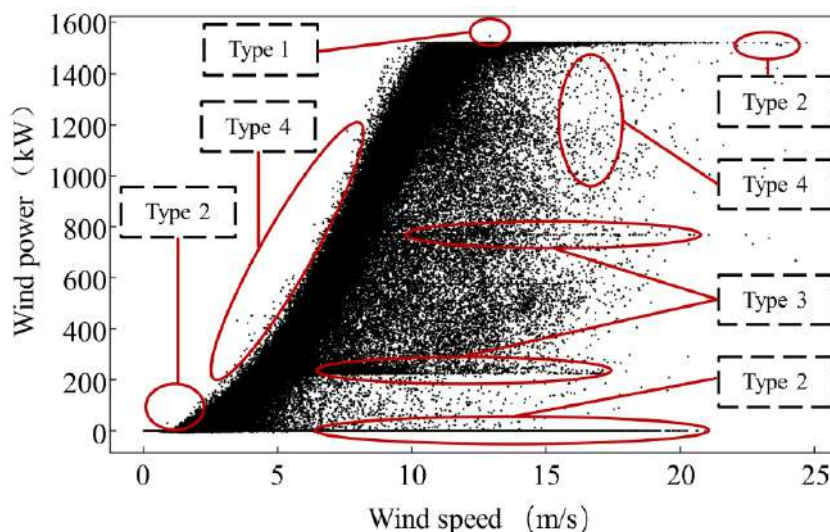
Los conjuntos de datos obtenidos mediante los sistemas SCADA de los aerogeneradores pueden contener datos anómalos que afectan significativamente la evaluación de la curva de potencia (Figura 1). Entre estos se encuentran: Type 1, fallos de sensor o errores de procesamiento, que generan velocidades negativas y potencias superiores a la nominal; Type 2, fallas del aerogenerador o anomalías operativas, donde aparece potencia con velocidad de viento superior a la de corte o cercana a cero con velocidades moderadas; Type 3, restricciones operativas o problemas de red, caracterizados por velocidades dentro del rango de operación pero potencias muy por debajo de lo esperado; y Type 4, ruido aleatorio, representado por puntos dispersos por encima y por debajo de la curva de potencia. Esta clasificación sigue lo propuesto por Yang et al. (2025).

Según el capítulo 8.4 de UNE-EN 61400-12-1 (2018) para obtener una curva de potencia que represente la operación en condiciones normales se deben identificar y excluir del conjunto de datos una gran cantidad de situaciones que afectan dicho funcionamiento normal, como por ejemplo velocidades de viento fuera del rango de operación del aerogenerador, ocurrencia de falla que impida el funcionamiento del aerogenerador, aerogenerador en modo de ensayo o mantenimiento, fallo o degradación de los sensores, dirección de viento en sectores afectados por obstáculos, etc.

3 MÉTODO DE ESTUDIO

En esta sección se presenta la metodología utilizada, subdividida en seis apartados principales (Figura 2). En *BdeD* se seleccionaron los datos a analizar (variables operativas de los aerogeneradores *Datos Originales*, ubicación de aerogeneradores y torre meteorológica *Datos Ubicación* y registros de alarmas *Datos Alarmas*). Durante el *Pre-Filtrado* se eliminaron variables irrelevantes o con lagunas de datos extensas, y en la *Selección Temporal* se definió un periodo representativo.

Figura 1: Datos anómalos en curva de potencia.

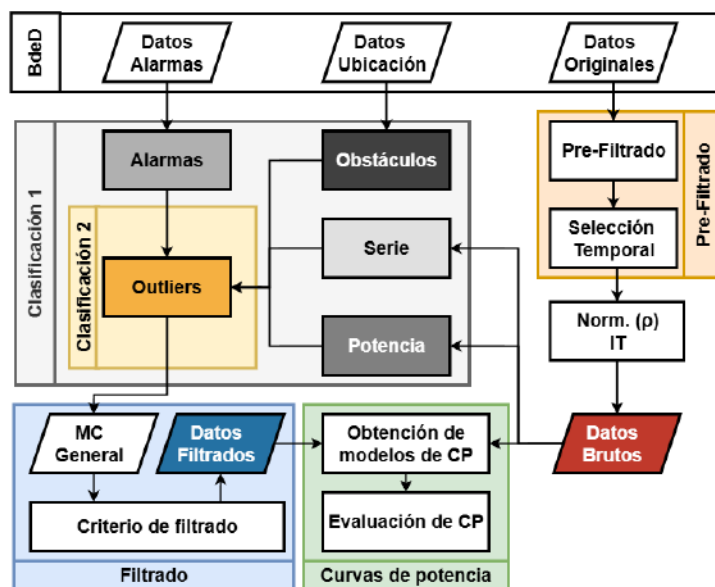


Fuente: (YANG et al., 2025).

Previo a la clasificación, se normalizó la velocidad del viento por densidad del aire (*Norma. (ρ)*) según [IEC 61400-12-2 \(2022\)](#) y se calculó la intensidad de turbulencia (*IT*), generando el conjunto *Datos Brutos*. En *Clasificación 1* se aplicaron filtros de calidad (*Alarmas*, *Obstáculos*, *Serie*) y en *Clasificación 2* se eliminaron outliers², obteniendo la matriz de clasificación general (*MC General*).

En la etapa de *Filtrado* se seleccionaron únicamente los datos válidos según las clasificaciones y el periodo de análisis (*Datos Filtrados*). Finalmente, en *Curvas de potencia* se ajustaron los modelos de curva de potencia sobre *Datos Brutos* y *Datos Filtrados*, y se compararon las métricas de evaluación obtenidas.

Figura 2: Descripción básica de metodología empleada.



Nota: CP: Curva de Potencia.

²Los outliers o datos atípicos son valores que se encuentran significativamente alejados de la mayoría de los datos en una distribución. Según el método del diagrama de caja (boxplot) se consideran outliers a los valores fuera del rango comprendido entre el primer cuartil ($Q1$) menos k veces el rango intercuartílico (IQR) y el tercer cuartil ($Q3$) más k veces el IQR . En este trabajo se tomó 1.5 como valor de k , siendo este un valor comúnmente utilizado, (NAVIDI, 2006).

3.1 Bases de datos

Para este trabajo se utilizaron principalmente los datos del sistema SCADA de ocho aerogeneradores de un parque eólico. En la Tabla 1 se presentan las variables analizadas para cada aerogenerador. Debido a que no se disponía de datos de presión atmosférica y humedad relativa medidos en los aerogeneradores se optó por utilizar los datos de la torre meteorológica para estas variables, asumiendo que estos son representativos para todos los aerogeneradores. Se nombra al conjunto de datos compuesto por las variables descritas en la Tabla 1 como *Datos Originales*. Cabe aclarar que por motivos de confidencialidad no se puede revelar información detallada de dicho parque como nombre, ubicación, potencia nominal del parque, cantidad de aerogeneradores, etc.

Tabla 1: Variables del conjunto Datos Originales.

Variable	Tipo	Variable	Tipo
Fecha	-	Velocidad en eje lento (rpm)	avg, max, std
Hora	-	Ángulo de pitch (°)	min, avg, max, std
Velocidad del viento (m/s)	min, avg, max, std	Temp. de aceite de la multiplicadora (°C)	avg
Potencia eléctrica (kW)	min, avg, max, std	Dirección relativa (°)	min, avg, max, std
Dirección del viento (°)	min, avg, max, std	Presión atmosférica TM (hPa)	min, avg, max, std
Temp. ambiente (°C)	min, avg, max, std	Humedad relativa TM (%)	min, avg, max, std

Nota: Superíndice *TM* indica variables de la torre meteorológica.

En cuanto al conjunto *Datos Ubicación* contiene la información necesaria (coordenadas y altura sobre el nivel del mar) de los aerogeneradores y mástiles meteorológicos del parque eólico. Vale la pena señalar que no se tiene presencia de ningún obstáculo significativo como edificaciones o árboles en las zonas cercanas a estos (UNE-EN 61400-12-1, 2018). Por último, el conjunto *Datos Alarmas* contiene todos los eventos registrados durante la operación del aerogenerador. Este conjunto de datos no tiene una resolución temporal específica.

3.2 Calidad de datos

3.2.1 Pre-Filtrado en serie de Aerogeneradores, Normalización (ρ) e intensidad de turbulencia

En el Pre-Filtrado se realizó con la finalidad de reducir las dimensiones del conjunto *Datos Originales* sin perjudicar de forma significativa al contenido de información relevante respecto al cálculo de la curva de potencia. En este paso se identificaron y excluyeron del conjunto de datos las variables vacías o con un Data Coverage Rate inferior al 40 %. Con los resultados de la etapa de Pre-Filtrado se aplicó la normalización de la velocidad de viento por densidad del aire (siguiendo el procedimiento establecido por la IEC 61400-12-2 (2022)) y al cálculo de la intensidad de turbulencia.

3.2.2 Clasificación 1

Tal como se muestra en la Figura 2, el procedimiento de *Clasificación 1* se realizó en múltiples etapas desarrolladas en paralelo (*Serie*, *Potencia*, *Alarmas* y *Obstáculos*). De la combinación de los resultados de cada etapa se obtuvo el conjunto de datos que se utilizó como entrada para la etapa de *Clasificación 2*. A continuación se detalla cada una de las etapas.

Calidad según Serie: Para este trabajo, calidad en la serie refiere a las comprobaciones aplicadas a la serie temporal para identificar errores en los datos debido a mediciones incorrectas, incoherencias en los registros de las variables, etc. El procedimiento aplicado puede verse en el diagrama de la Figura 3, a continuación se realiza una descripción de cada componente de dicho diagrama.

- Datos Brutos: Serie temporal sin aplicarle la metodología de calidad.
- Matriz de Clasificación (*MC*): Estructura utilizada para guardar información sobre la clasificación de los datos respecto al criterio de filtrado. Válido (1) o no válido (0).
- Matriz de Test (*MTest*): Estructura utilizada para guardar información sobre datos evaluados por un filtro. Dato fue evaluado (1) o no fue evaluado (0).
- Homogenización: Proceso para extender una matriz de clasificación a variables no evaluadas. La matriz Homogeneizada debe contener la clasificación obtenida para el filtrado de las variables a las cuales se les aplica el filtro y para las variables a las cuales no se les aplicó el filtro. En estas últimas se asigna el marcador de dato válido.

- **Datos Pre-Tratados:** Serie temporal resultante de la aplicación de los filtros anteriores (A3-Fecha, A3-NN, NN, C, D y S) y la utilización de un criterio basado en variables (*CBV*). Se utiliza antes del Filtro E para minimizar el efecto de los datos inválidos en las correlaciones entre las variables.
- **Calificador Final:** Función utilizada para crear una Matriz de Clasificación Final (*MCF*), que combina los resultados de cada filtro aplicado. En base a *MCF* se seleccionan los datos válidos y no válidos mediante dos criterios: el Criterio General (*CG*), que elimina las filas en las que haya al menos un dato clasificado como no válido en cualquier variable, y el Criterio Basado en Variable (*CBV*), que evalúa cada variable por separado y elimina únicamente los datos inválidos de cada variable (sustituyéndolos por *nan*) sin afectar a las demás.
- **Datos Clasificados:** Serie temporal resultante de aplicar los filtros establecidos en la metodología de calidad adoptada.

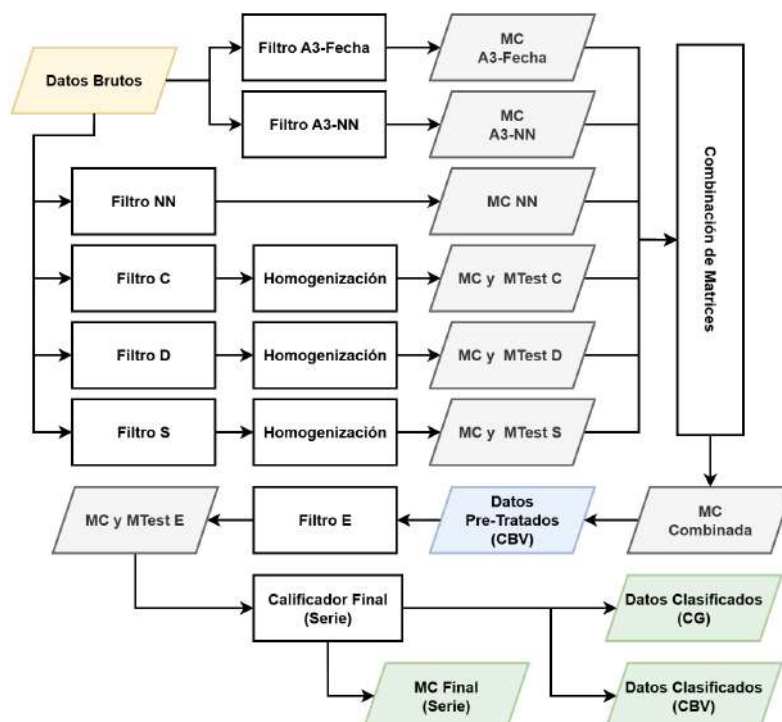
La Tabla 2 muestra los criterios utilizados para cada filtro aplicado al conjunto de *Datos Brutos*. Si un dato no cumplió con el criterio establecido este fue catalogado como no válido en la matriz de clasificación correspondiente, en el caso contrario se consideró válido.

Tabla 2: Criterios de filtrado

Filtro	Lógica	No evaluados
NN	Valores no numéricos	
A3-Fecha	n datos sucesivos faltantes en fecha	
A3-NN	n datos sucesivos no numéricos	
S	$X \geq R_{sup}$ or $R_{inf} \geq X$	nan
C	$X_{min} \geq X_{avg}$ and $X_{max} \geq X_{avg}$ $X_{avg} \geq X_{max}$ and $X_{avg} \geq X_{min}$ $X_{min} \geq X_{avg}$ and $X_{avg} \geq X_{max}$	nan
D	n repeticiones sucesivas en las variables	nan
E	Correlación entre variables inferior a umbral	nan

Nota: X : Variable analizada. R_{sup} y R_{inf} : Umbral superior e inferior respectivamente configurado para el filtro S. n : cantidad de datos válidos esperados en un periodo de N días (en este trabajo $N = 15$ días).

Figura 3: Metodología de calidad aplicada a las series de los aerogeneradores.



Calidad según Potencia: El filtrado de rango, el de inconsistencias (Filtro S en la Figura 3) y el de alarmas permitieron descartar condiciones no operativas del aerogenerador. Sin embargo, persistían valores de potencia anómalos, ya que el rango aplicado inicialmente fue de -10 % y 110 % de la potencia nominal. Se aplicó un filtrado adicional sobre las variables de potencia, se descartaron registros con valores mínimos o promedios iguales o inferiores a cero, y aquellos cuya potencia máxima no superó el 5 % de la nominal. Esto evitó sesgos en las curvas de potencia por la acumulación de registros con potencia nula en rangos de viento moderado, además de reducir el ruido aleatorio.

Calidad según Obstáculos: Para evaluar los datos afectados por obstáculos o aerogeneradores vecinos fue necesario clasificar los sectores de dirección en los cuales no se tuviese efecto de obstáculos sobre las mediciones de viento en el aerogenerador a evaluar³. Los sectores de dirección sin afectación por obstáculos⁴ se obtuvieron según el procedimiento establecido por UNE-EN 61400-12-1 (2018) en el Anexo A.4. Se consideraron tres clases de obstáculos (Tabla 3), la torre meteorológica, aerogeneradores parados (sin producción de energía y con velocidad en el eje lento igual 0 rpm) y los aerogeneradores en operación (casos fuera de condiciones para aerogenerador parado). Para diferenciar el caso de obstáculo Tipo 2 del Tipo 3, se agregó al conjunto de datos una nueva columna para cada aerogenerador.

Tabla 3: Tipos de obstáculos considerados y características

Obstáculo	Característica	Tipo
Torre meteorológica		Tipo 1
Aerogenerador parado	Potencia ≤ 0 MW y Rotor RPM = 0 rpm	Tipo 2
Aerogenerador operativo	Potencia > 0 MW o Rotor RPM > 0 rpm	Tipo 3

Calidad según condición de funcionamiento (Alarmas) En esta etapa se identificaron los intervalos de tiempo diezminutales en los cuales se tenían registros de alarmas, sin importar la causa de estas (no es objetivo de este trabajo identificar el tipo de alarma). Obtener los datos en donde el aerogenerador opera normalmente fue necesario para cumplir con los requerimientos establecidos por IEC 61400-12-2 (2022) en los apartados 8.2 y 8.6. Este criterio fue adoptado para los demás modelos de curva de potencia estudiados.

3.2.3 Clasificación 2

Se realizó una clasificación de outliers para las variables de velocidad de viento normalizada, intensidad de turbulencia, densidad del aire y temperaturas ambiente. Debido a las características de operación de los aerogeneradores y a los filtrados previos no se aplicó la clasificación de outliers a las demás variables. Se utilizó como base el conjunto de *Datos Clasificados (CBV)*, ver Figura 3 y como método de detección de Outliers se utilizó el método del Rango Intercuartílico, IQR (TUKEY et al., 1977).

3.2.4 Unificación de matrices de clasificación y filtrado

Una vez obtenidas las matrices de clasificación para las series de los aerogeneradores, el análisis de obstáculos, las alarmas y los outliers se procedió a crear una estructura de datos que contuviese toda la información de cada una de las matrices de clasificación generadas. Utilizando la matriz de clasificación general obtenida para cada aerogenerador, se aplicaron los criterios de filtrado a los *Datos Brutos* para obtener los conjuntos de *Datos Filtrados*.

3.3 Modelos de curva de potencia y desempeño.

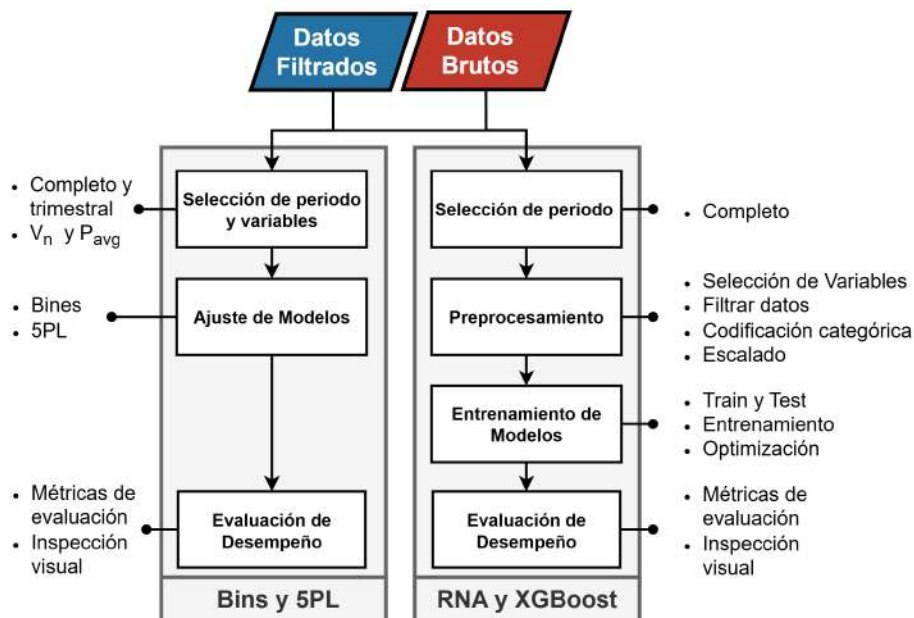
Para ajustar los modelos de curva de potencia a cada conjunto de datos (filtrados y brutos) de cada aerogenerador, se aplicó el procedimiento presentado en la Figura 4. Resumiendo, para los modelos de Bines y 5PL, se evaluaron en el periodo de tiempo completo y por trimestre. Se ajustó un modelo de curva de potencia (método de bines, (2.1.1) y el modelo logístico de cinco parámetros, (2.1.2) a las variables de promedio para la velocidad del viento normalizada por la densidad del aire (V_n) y la potencia eléctrica (P_{avg}). Una vez obtenidos los modelos de curva de potencia, se evaluó el desempeño de cada

³Cabe aclarar que en este paso no se capturan los efectos de la topografía del propio terreno sobre cada máquina

⁴Definido en base a la UNE-EN 61400-12-1 (2018), Tabla A.1. Para el caso de estudio se consideran obstáculos la torre de medición y los aerogeneradores.

uno de estos utilizando las métricas de evaluación presentadas en 2.2.

Figura 4: Ajuste de modelos de curva de potencia.



En los modelos no paramétricos (RNA y XGBoost) se evaluó el periodo completo, aprovechando su capacidad para extraer relaciones complejas de grandes conjuntos de datos. Como variables predictoras (*features*) se utilizaron tanto variables meteorológicas como datos de operación del aerogenerador, con el fin de capturar los factores físicos, temporales y operativos que afectan la potencia generada. Entre estas variables se incluyen la velocidad normalizada y la densidad del aire (energía disponible en el viento), la intensidad de turbulencia (variabilidad del viento), la temperatura ambiente, la velocidad en eje lento, el ángulo de pitch y la temperatura de la multiplicadora (condición y control operativo del aerogenerador), así como la dirección relativa y absoluta del viento (efectos de estela y terreno). También se consideró la fecha y hora para capturar estacionalidad y patrones intradiarios. Las variables categóricas, como la dirección de viento y componentes de fecha, se codificaron mediante *one-hot encoding* (Géron, 2019), utilizando 16 sectores para la dirección y descomponiendo la fecha en año, mes y hora. La variable objetivo (*target*) fue la potencia eléctrica del aerogenerador.

Para las Redes Neuronales Artificiales (RNA), el entrenamiento se realizó utilizando mini-batches y validación cruzada (*k-fold*) para garantizar una adecuada generalización del modelo. La optimización de hiperparámetros se llevó a cabo mediante búsqueda bayesiana, ajustando el número de capas ocultas, neuronas por capa, función de activación, tasa de aprendizaje, tamaño de lote y número de épocas. Para evitar sobreajuste se emplearon técnicas de regularización por *dropout*, penalización L2, *early stopping* y validación cruzada. La función de pérdida utilizada fue RMSE y las métricas de evaluación consideradas fueron RMSE y R^2 .

En el caso de XGBoost, el entrenamiento se realizó sobre el conjunto de prueba completo utilizando *early stopping* para controlar la generalización del modelo. La optimización de hiperparámetros también se efectuó mediante búsqueda bayesiana, ajustando el número de árboles, la profundidad máxima, la regularización L1 y L2, y la tasa de aprendizaje. Para manejar el sobreajuste se aplicaron regularización L1 y L2, sub-muestreo, control de divisiones mediante el parámetro γ y *early stopping*. La función de pérdida utilizada fue RMSE y las métricas de evaluación fueron RMSE y R^2 .

Una vez obtenidos todos los modelos de curva de potencia (IEC, 5PL, RNA y XGBoost) para cada conjunto de datos (*Datos Brutos* y *Datos Filtrados*) se procedió a comparar las métricas de evaluación y los curvas de potencia obtenidas para cada caso. Se calculó además la diferencia entre el RMSE (%) correspondiente a los modelos ajustados con los datos filtrados y con los datos brutos. Este indicador fue de utilidad a la hora de evaluar para múltiples periodos de tiempo (trimestres) la diferencia de desempeño entre el mismo tipo de modelo pero ajustado a distintos datos de entrada.

4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Pre-Filtrado

Durante esta etapa se identificaron variables vacías, en el conjunto de datos originales para todos los aerogeneradores, estas fueron la Dirección relativa (mínima, máxima y desviación estándar). Se desconoce la causa de esta falta de datos y se consideraron los valores promedios de dirección relativa para las etapas posteriores.

4.2 Clasificación 1 y Clasificación 2

En la clasificación basada en obstáculos se determinó el porcentaje de tiempo operativo de cada aerogenerador según la condición de funcionamiento (Tabla 3). Como muestra la Tabla 4, todos los aerogeneradores presentan más del 87 % de registros en operación estable, siendo el aerogenerador 4 el más afectado por obstáculos vecinos. Esta clasificación se utilizó únicamente para identificar los sectores a excluir por estela de obstáculos. La clasificación por condición de funcionamiento (*Alarmas*) indicó bajos porcentajes de intervalos con eventos de alarma en todos los aerogeneradores, y solo se consideró para excluir esos intervalos en el cálculo de la curva de potencia, sin evaluar las alarmas en sí. Finalmente, la clasificación de *outliers* (Tabla 4) muestra que el aerogenerador con mayor porcentaje de valores atípicos es el 5.

Tabla 4: Resultado de clasificación obstáculo, alarmas y outliers.

Aerogenerador	1	4	5	6	7	8	9	10
Tiempo operativo (%) ^I	89.4	87.3	93.8	92.5	89.5	90.0	92.9	92.6
Válidos (%) ^I	75.1	67.7	87.4	80.1	76.0	79.1	76.9	82.1
Intervalos con eventos (1%) ^{II}	1.1	1.8	0.9	0.6	0.9	0.8	1.0	1.0
Válidos (%) ^{III}	93.9	94.1	89.9	94.5	93.8	94.3	94.7	95.4

Nota: Porcentajes calculados sobre 210384 registros. El superíndice *I* indica resultados para el filtro de obstáculos, *II* para alarmas y *III* para outliers.

4.2.1 Filtrado

Se realizó la evaluación para todo el periodo analizado (01/01/2018 00:00 al 31/12/2022 23:50) para obtener modelos de curva de potencia representativos, considerando únicamente los datos clasificados como válidos en la matriz de clasificación general. La Figura 5 muestra los porcentajes de datos válidos por cada etapa de filtrado y el total combinado. Se observó que los filtros por potencia y por obstáculos son los con mayor incidencia en el total de datos válidos, mientras que los filtros por alarmas, serie y outliers obtienen porcentajes altos de datos válidos. La combinación de todos los filtros provoca una disminución adicional de los datos válidos, debido a que algunos intervalos cumplen los criterios de un filtro pero no de otros.

4.2.2 Modelos de curva de potencia de Bines y de curva logística

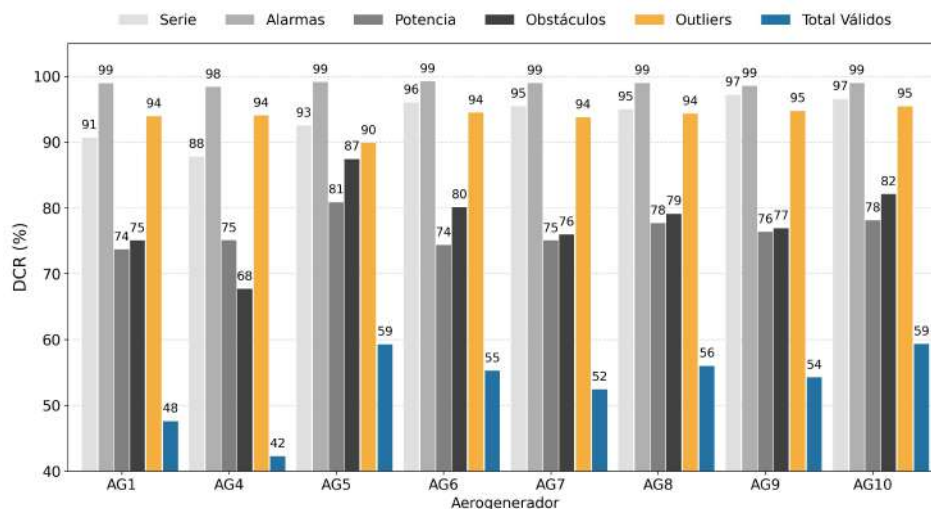
La Figura 6 muestra para los aerogeneradores 4 y 5 los datos brutos y filtrados de potencia versus velocidad de viento normalizada por densidad del aire, junto con los modelos de Bines (IEC, 2.1.1) y logístico de cinco parámetros (5PL, 2.1.2) ajustados a cada conjunto.

En los modelos 5PL, ambos ajustes coinciden hasta 0.75 pu, divergiendo a velocidades mayores; cerca de 1 pu, el modelo con datos brutos (5PL(DB)) subestima la potencia respecto al modelo con datos filtrados (5PL(DF)), probablemente debido a la gran cantidad de registros con potencia cercana a cero a velocidades moderadas.

En los modelos IEC, el comportamiento hasta 0.75 pu es similar, pero para velocidades mayores, los datos filtrados (IEC(DF)) muestran un buen ajuste hacia una curva típica, con ligera distorsión cerca de 1.25 pu por escasez de datos y ruido residual. Los modelos con datos brutos (IEC(DB)) presentan gran variabilidad a partir de 0.75 pu, ya que los valores anómalos adquieren mayor peso en el promedio por bin. Este patrón se observó en todos los aerogeneradores evaluados.

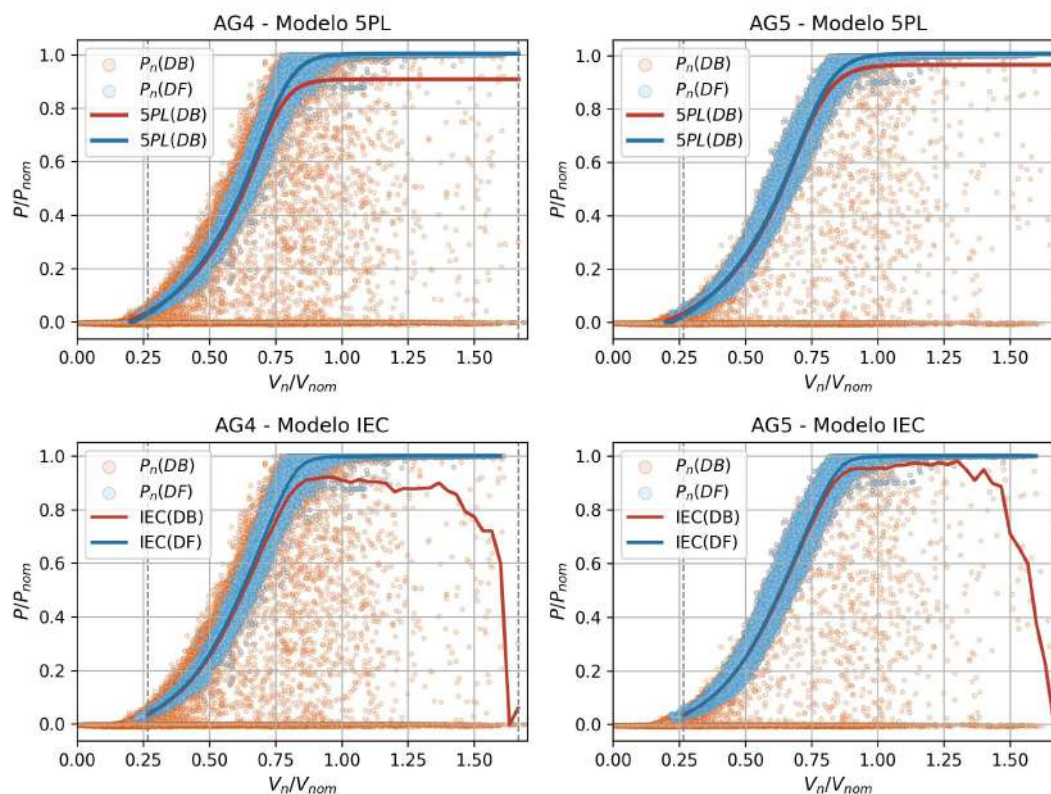
a Figura 7 muestra las métricas de desempeño (RMSE y R^2) para cada aerogenerador. Se observó que los modelos ajustados con datos filtrados superan a los basados en datos brutos. El RMSE, expresado como porcentaje de la potencia nominal, es mayor en el aerogenerador 4 y menor en el 5 para los modelos con datos brutos, reflejando la cantidad de datos invalidados por la metodología de calidad. El

Figura 5: Datos válidos para modelo de curva de potencia.



Nota: Porcentajes calculados sobre 210384 registros.

Figura 6: Curvas de potencia obtenidas por modelo de Bines y de curva logística.

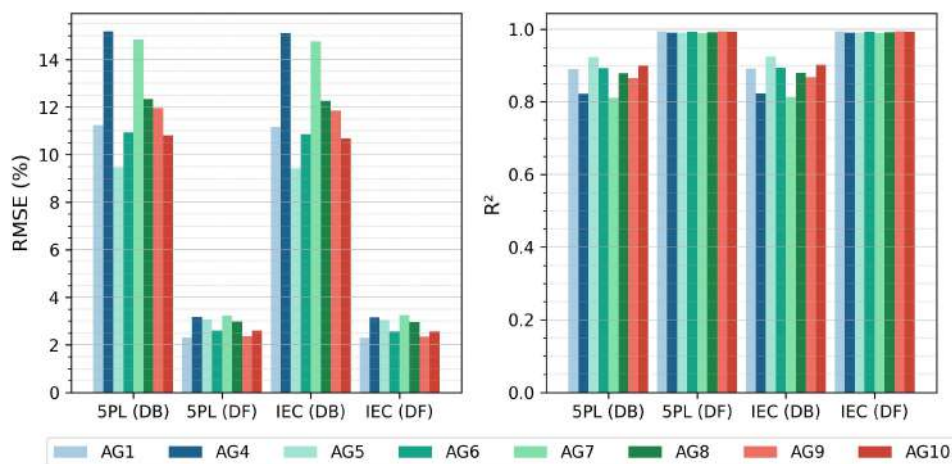


coeficiente de determinación R^2 es alto ($> 0,8$) en todos los casos, con el aerogenerador 5 obteniendo los valores más altos y el 4 los más bajos, aunque las diferencias son menos marcadas que en el RMSE.

Se obtuvieron los modelos de Bines y curvas logísticas a periodos trimestrales. La cantidad de datos filtrados y el DCR mostraron gran variabilidad entre aerogeneradores. La Tabla 5 presenta los estadísticos descriptivos del DCR (media, mínimo, máximo y desviación estándar) para cada aerogenerador. En general, los filtros que más contribuyeron a reducir el DCR fueron los de potencia y obstáculos, con algunas excepciones en el filtrado de la serie, correspondientes a periodos con ausencia de datos (lagunas o valores no numéricos).

Respecto a los modelos de curva de potencia ajustados para periodos de tiempo menores (escala trimestral) pudo constatare de que en todos los trimestres evaluados y para todos los aerogeneradores

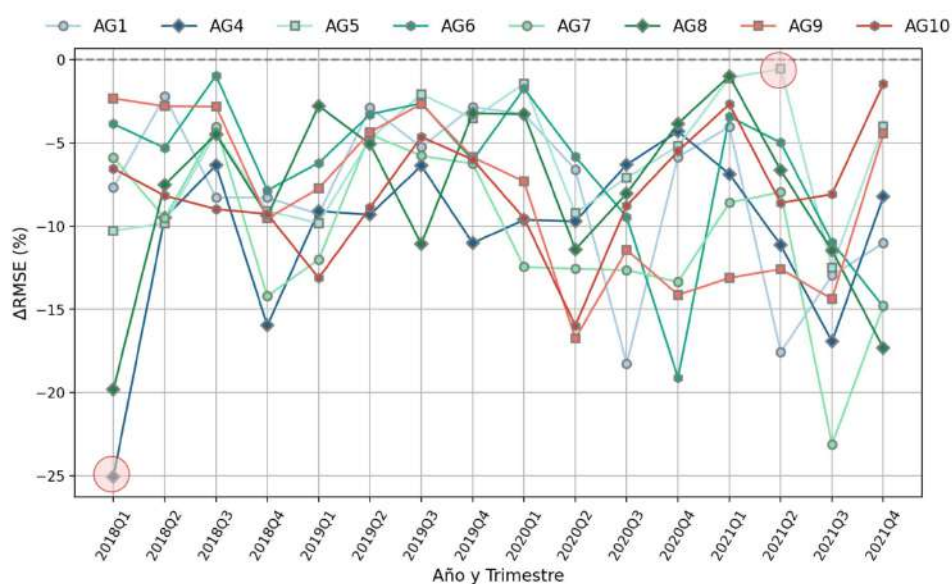
Figura 7: Métricas de evaluación para modelo de Bines y de curva logística.


Tabla 5: Estadísticas descriptivas para el *DCR* trimestral

Aerogenerador	1	4	5	6	7	8	9	10
Mínimo (%)	13.3	0.0	34.8	15.5	20.4	2.8	34.6	34.1
Media (%)	47.6	42.2	59.3	55.3	52.4	56.0	54.2	59.3
Máximo (%)	66.4	64.5	74.5	73.1	70.7	74.5	72.0	72.3
Desv.Estándar (%)	10.0	12.6	9.5	9.7	10.2	11.9	8.8	9.2

el RMSE obtenido por los modelos ajustados a los datos filtrados fue menor al obtenido por el ajuste basado en los datos brutos. Como evidencia de esto se presenta en la Figura 8 el $\Delta RMSE$, siendo este el resultado de la diferencia entre el RMSE (%) obtenido con los datos filtrados y el obtenido con los datos brutos. Se destacan dentro de círculos rojos al caso con una mayor diferencia en las métricas de los modelos (Aerogenerador 4 en primer trimestre del 2018) y al de menor diferencia (Aerogenerador 5 en el tercer trimestre del 2021).

Figura 8: Métricas de evaluación para modelo de Bines y de curva logística.

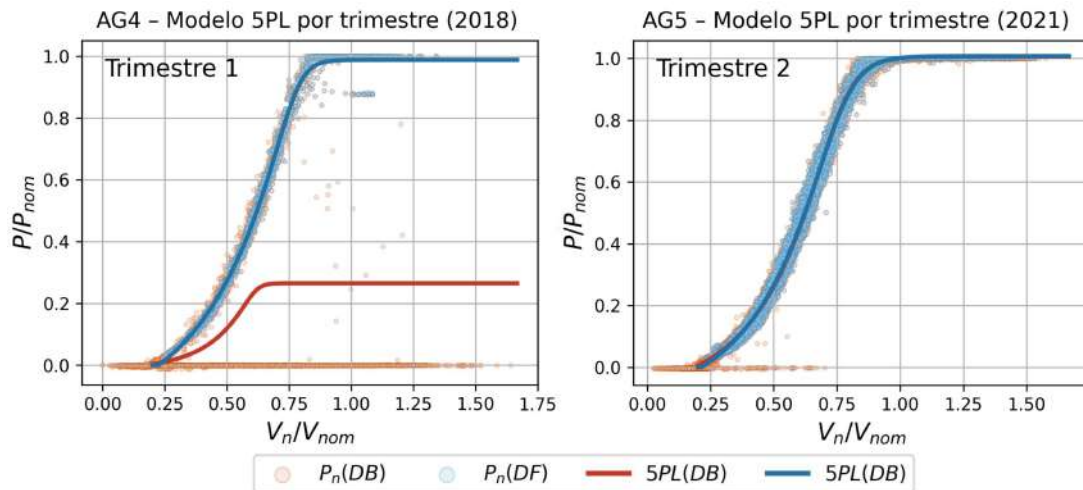


Nota: Se indica el año trimestre como YYYYQi, siendo Qi el trimestre 1, 2, 3 y 4.

La Figura 9 muestra los modelos logísticos obtenidos para el primero trimestre del 2018 en el aerogenerador 4 y para el segundo trimestre del 2021 en el aerogenerador 5. Se observa como en el primer

caso hay una gran diferencia en el resultado de los modelos, esta puede atribuirse a la gran cantidad de datos con valores de potencia cercana a cero para velocidades de viento moderadas. En el segundo caso se aprecia como ambos modelos obtienen resultados muy similares debido a la similitud de los conjuntos de datos filtrados y brutos.

Figura 9: Modelo de curva logística por trimestre .



4.2.3 Modelos de curva de potencia no paramétricos (RNA y XGBoost)

Como entrada para los modelos de aprendizaje automático se utilizaron los conjuntos de datos brutos y filtrados. En la primera etapa de preprocesamiento se eliminaron todas las filas con al menos un valor faltante (*nan*) en las variables predictoras o en la variable objetivo. La Tabla 6 presenta los valores resultantes de *DCR* para cada aerogenerador.

Tabla 6: Resultado de *DCR* en datos para modelos no paramétricos.

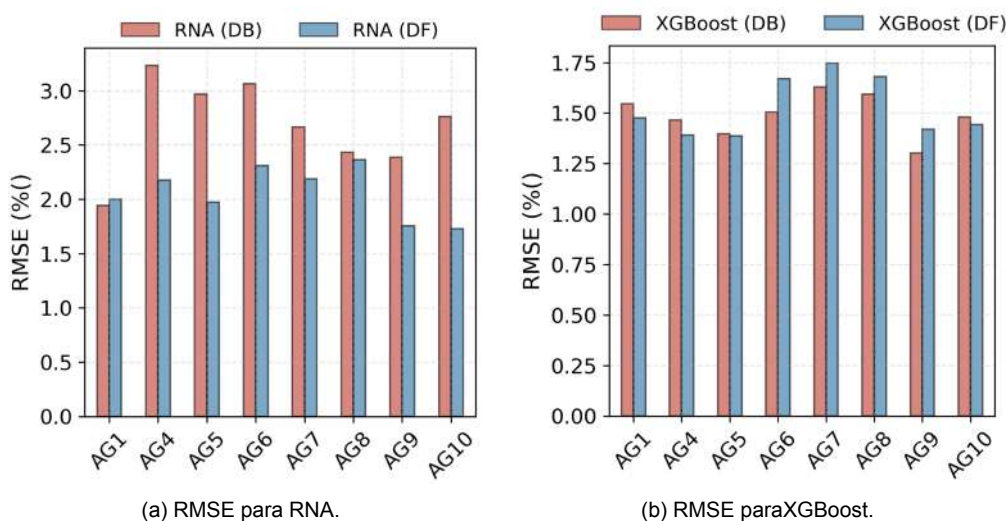
Aerogenerador	1	4	5	6	7	8	9	
DCR (DB)	90.6	87.8	92.5	96.0	95.4	95.0	97.2	96.5
DCR (DF)	47.6	42.2.0	59.3	55.3	52.4	56.0	54.2	59.3

Tras entrenar los modelos se evaluaron las curvas de aprendizaje para detectar sobreajuste. Se verificó que no hubo sobreajuste, ya que las curvas de pérdida de las RNA y de error de XGBoost convergen a valores bajos en los conjuntos de entrenamiento y validación, indicando buena generalización de los modelos. En la Figura 10a se muestra el *RMSE* obtenido por los modelos de RNA en los conjuntos de prueba correspondientes, en ésta puede observarse como en los modelos entrenados en base a los datos filtrados logran un mejor desempeño. Aún así en ambos casos se obtuvo un valor de *RMSE* considerado como bajo. Para el caso de los modelos XGBoost puede verse en la Figura 10b como logra mejores predicciones respecto a los modelos de RNA (menor *RMSE*). Respecto al coeficiente de determinación, se obtuvieron valores altos en todos los casos evaluados (RNA y XGBoost en datos brutos y filtrados) lo que indica una alta linealidad entre el resultados medidos y las predicciones de los modelos.

Si se comparan las métricas de desempeño entre los modelos de Bines, curvas logísticas y los modelos no paramétricos puede observarse como en estos últimos las diferencias entre los resultados obtenidos para los conjuntos de datos brutos y datos filtrados no son tan significativas. Esto se debe al buen desempeño mostrado por estos tipos de modelos y su gran capacidad de generalizar y captar las relaciones lineales y no lineales complejas entre múltiples variables.

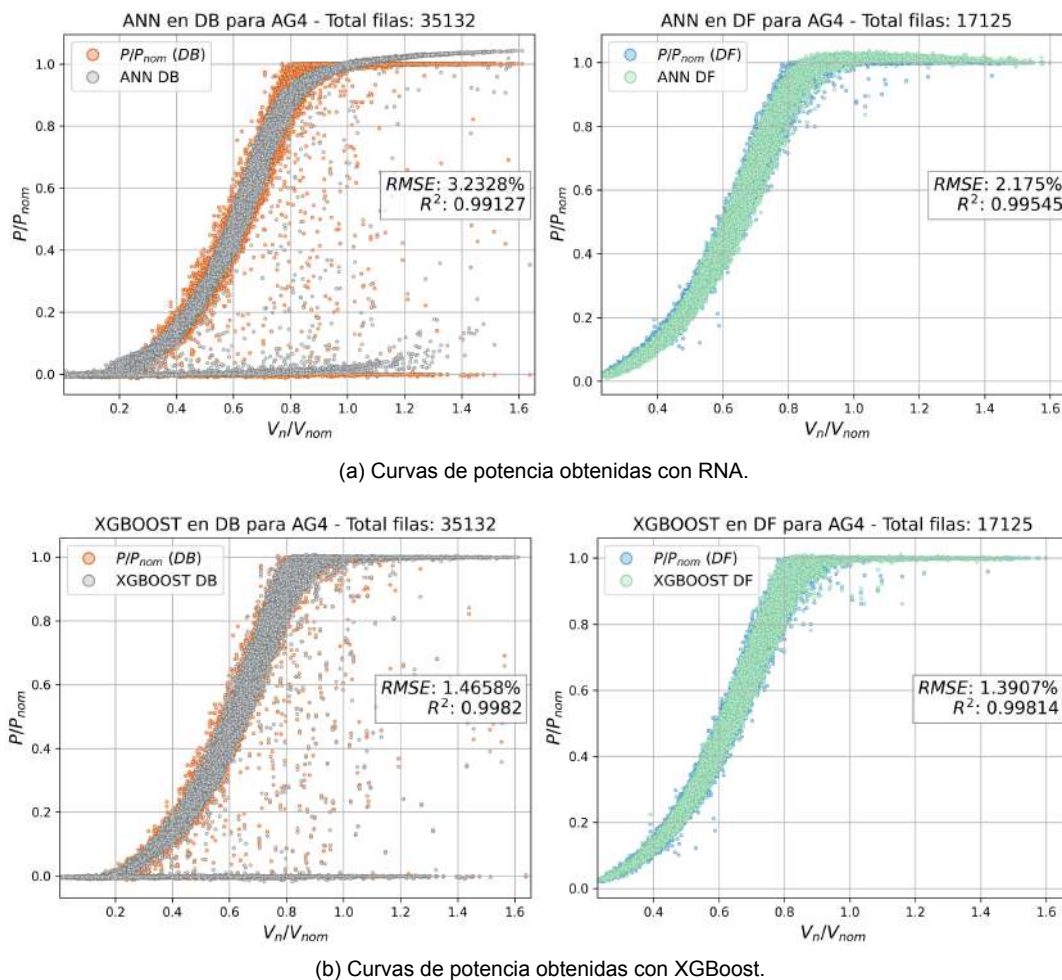
Debido al buen desempeño obtenido por los modelos basados en datos brutos y su relativa simplicidad a la hora del preprocesamiento comparada con la de los datos filtrados, podría pensarse que se obtendría una buena estimación de una curva de potencia representativa o buenas predicciones de potencia del aerogenerador. Sin embargo si se evalúan visualmente las curvas de potencia resultantes de los conjuntos de validación puede verse como los modelos basados en los datos brutos captan también los casos donde se tiene una operación anómala (potencia cero velocidades moderadas) y el ruido, etc. (además en los modelos basados en RNA se observó una tendencia a obtener valores de

Figura 10: RMSE para modelos RNA y XGBoost.



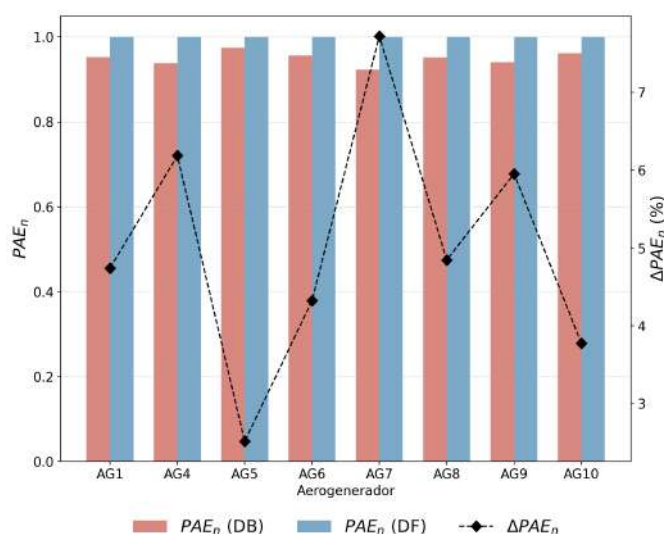
potencia superiores a la potencia nominal para altas velocidades de viento dentro del rango de operación). En cambio los modelos basados en los datos filtrados obtuvieron un comportamiento más acorde al esperado durante la operación normal del aerogenerador. Este comportamiento se observó en todos los aerogeneradores evaluados, a modo de ejemplo en la Figura 11 se muestran los casos para los modelos basados en RNA y XGBoost para el aerogenerador 4.

Figura 11: Curvas de potencia obtenidas con RNA y XGBoost en aerogenerador 4.



Para obtener una aproximación del efecto de la metodología de calidad en los resultados obtenidos por un análisis de producción de energía, se presenta en la Figura 12 el resultado de calcular la producción anual de energía para una distribución de Rayleigh con un factor de escala de 9.5 m/s utilizando los modelos de curva logística obtenidos en base a los datos brutos y filtrados. A efectos de centrar el análisis en la diferencia de producción entre los modelos de un mismo aerogenerador la producción anual de energía se normaliza según el valor obtenido para los datos filtrados. Puede observarse como en todos los casos se obtuvo una mayor estimación de la producción de energía con los modelos ajustados a los datos filtrados llegando a un máximo de 7.7 % para el aerogenerador 7 y un mínimo del 2.5 % en el aerogenerador 4.

Figura 12: Producción anual de energía para modelos de curva logística.



5 CONSIDERACIONES FINALES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El tratamiento de calidad tuvo un peso central en el estudio, ya que partir de una base sólida y confiable es esencial para cualquier análisis. Se logró construir un conjunto de datos con un nivel de confiabilidad superior al inicial, gracias a la identificación y clasificación de diversas incoherencias.

El estudio evidencia que la calidad de los datos utilizados influye fuertemente en la confiabilidad de las curvas de potencia obtenidas. Los datos filtrados, al eliminar registros anómalos y condiciones operativas no representativas, permiten generar modelos más fieles al comportamiento real de los aerogeneradores. Esto es especialmente notorio en los modelos de bins y de curvas logísticas, donde la diferencia entre usar datos brutos o filtrados se refleja en mejoras significativas en las métricas de evaluación.

Aunque los modelos no paramétricos como RNA y XGBoost mantienen un buen desempeño incluso con datos sin tratar, su entrenamiento con conjuntos que incluyen datos inválidos no garantiza representatividad del comportamiento esperado durante la operación normal. En contraste, los modelos entrenados con datos filtrados presentan curvas de potencia más coherentes, lo que mejora la interpretación de los resultados. Además, la comparación entre curvas logísticas ajustadas mostró que el uso de datos filtrados permite estimar una mayor producción energética anual, debido a la eliminación de los datos anómalos que provocan una subestimación sistemática para velocidades de viento superiores a 0.75, reforzando la importancia de aplicar metodologías robustas de calidad de datos.

Para futuros trabajos sería interesante ampliar el análisis a más parques eólicos, con distintas tecnologías de aerogeneradores y condiciones de emplazamiento, de esta forma se obtener un contexto más generalizado. También puede ser de interés explorar técnicas de imputación de datos, y estudiar como estas influyen en la construcción de las curvas de potencia y en la estimación de la producción anual de energía.

REFERENCIAS

AYER, V. M. WHY SCIENTISTS SHOULD LEARN TO PROGRAM IN PYTHON. *POWDER DIFFRACTION*, v. 29, n. S2, p. S48–S64, 2014.

BEN. *Balance Energético Nacional*. 2023. <<https://ben.miem.gub.uy/descargas/1balance/1-1-Libro-BEN2023.pdf>>. Accessed: 2025.

GARCÉS-RUIZ, A.; GONZÁLEZ, W. G.; GIRALDO, O. M. *Introducción a la estabilidad de sistemas eléctricos de potencia*. [S.l.: s.n.], 2023. ISBN 978-958-722-896-0.

GÉRON, A. *HANDS-ON MACHINE LEARNING WITH SCIKIT-LEARN, KERAS, AND TENSORFLOW: CONCEPTS, TOOLS, AND TECHNIQUES TO BUILD INTELLIGENT SYSTEMS*. 2. ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2019. ISBN 978-1-492-03264-9.

IEC 61400-12-2. *WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS - PART 12-2: POWER PERFORMANCE OF ELECTRICITY PRODUCING WIND TURBINES BASED ON NACELLE ANEMOMETRY*. Geneva, CH, 2022. v. 2. Disponível em: <<https://iec.ch/homepage>>.

JING, B. et al. WIND TURBINE POWER CURVE MODELLING WITH LOGISTIC FUNCTIONS BASED ON QUANTILE REGRESSION. *Applied Sciences*, v. 11, n. 7, 2021. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/7/3048>>.

NAVIDI, W. C. *Estadística para ingenieros y científicos*. [S.l.: s.n.], 2006.

OZMINKOWSKI, R. Gigo in towards data science by ron ozminkowski. *Laboratory Phonology*, 11 2021.

Python Software Foundation. 2024. <<https://www.python.org/>>.

SOHONI, V.; GUPTA, S.; NEMA, R. A CRITICAL REVIEW ON WIND TURBINE POWER CURVE MODELLING TECHNIQUES AND THEIR APPLICATIONS IN WIND BASED ENERGY SYSTEMS. *Journal of Energy*, v. 2016, p. 1–18, 01 2016.

Stack Overflow. *2024 Stack Overflow developer survey*. 2024. <<https://survey.stackoverflow.co/2024/>>. Accessed: 2024.

TUKEY, J. W. et al. *Exploratory data analysis*. [S.l.]: Springer, 1977. v. 2.

UNE-EN 61400-12-1. *UNE-EN 61400-12-1:2018 MEDIDA DE LA CURVA DE POTENCIA DE AEROGENERADORES PRODUCTORES DE ELECTRICIDAD*. Madrid, España, 2018. v. 1. Disponível em: <<https://www.une.org/>>.

VILLANUEVA, D.; FEIJÓO, A. Comparison of logistic functions for modeling wind turbine power curves. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 155, p. 281–288, 2018.

WANDERLEY, C. F. W. d. C. B. M. *PROCEDIMENTO OBJETIVO PARA A GARANTIA DA QUALIDADE DE DADOS OBSERVACIONAIS DE VENTO EM SUPERFÍCIE NO LITORAL DO RIO GRANDE DO NORTE*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

WMO. Standard, *DIRECTRICES PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD Y EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LOS DATOS DE ESTACIONES DE OBSERVACIÓN EN SUPERFICIE PARA APLICACIONES CLIMÁTICAS*. 2021. Disponível em: <<https://wmo.int/>>.

YANG, H. et al. Wind power data cleaning using ransac-based polynomial and linear regression with adaptive threshold. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group UK London, v. 15, n. 1, p. 5105, 2025.

O Rio Grande do Sul como Vetor Estratégico do Setor Eólico

Alex Willian Petter¹, Guilherme Lucas Etges¹, Stevan Ruschel da Silveira¹, Adriane Prisco Petry²

(1) Renobrax Energias Renováveis

(2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS - NIEPIEE)

alex.petter@renobrax.com.br, guilherme.etges@renobrax.com.br, stevan.silveira@renobrax.com.br,
adrianep@mecanica.ufrgs.br

RESUMO

A expansão acelerada das fontes renováveis intermitentes no Brasil tem trazido desafios estruturais relevantes, sobretudo a crescente concentração de geração em regiões distantes dos centros de carga e com perfis de produção horária muitas vezes desalinhados com o consumo. Diante desse cenário, o estado do Rio Grande do Sul surge como uma alternativa complementar e estratégica para a continuidade da expansão da energia eólica no país. Este artigo analisa atributos como margem de conexão disponível, infraestrutura logística, complementariedade de geração, estabilidade regulatória e sinergia com os principais centros consumidores do Sudeste, demonstrando como o estado pode atuar como um vetor de equilíbrio e resiliência para o sistema. Além disso, destaca-se o papel do estado na preservação da cadeia produtiva nacional e na preparação para novas demandas industriais baseadas em energia limpa, como datacenters, produção de hidrogênio verde e fertilizantes sustentáveis.

Palavras-chaves:

Energia eólica; Planejamento energético; Complementariedade de geração; Rio Grande do Sul; Expansão renovável; Segurança energética.

ABSTRACT

The rapid expansion of intermittent renewable energy sources in Brazil has brought significant structural challenges, particularly the increasing concentration of generation in regions far from major load centers and with hourly production profiles often misaligned with consumption patterns. In this context, the state of Rio Grande do Sul emerges as a complementary and strategic alternative for the continued growth of wind power in the country. This article analyzes key attributes such as available grid connection capacity, logistical infrastructure, generation complementarity, regulatory stability, and synergies with consumer centers in the Southeast, demonstrating how the state can serve as a vector for system balance and resilience. In addition, the state's role in preserving the national supply chain and preparing for emerging clean-energy-driven industrial demands, such as data centers, green hydrogen production, and sustainable fertilizers, is also highlighted.

Keywords:

Wind energy; Energy planning; Generation complementarity; Rio Grande do Sul; Renewable expansion; Energy security.

1. INTRODUÇÃO

A transição energética avança no Brasil com forte protagonismo das fontes renováveis, especialmente da energia solar e, também, da eólica, que conta com mais de 33 Gigawatts (GW) instalados (ANEEL, 2025). Esse valor representa um crescimento de quase 100% em relação a 2020, ano em que a fonte possuía pouco mais de 17 GW instalados (EPE, 2024).

No entanto, a rápida expansão das renováveis distante dos centros de carga e com geração desalinhada ao perfil horário de consumo de energia tem criado desafios operacionais para o Sistema Interligado Nacional (SIN) e ocasionado problemas como o curtailment (ONS, 2025). Nesse contexto, torna-se cada vez mais relevante um planejamento corporativo robusto para diversificar geograficamente e tecnologicamente os investimentos promovendo também maior equilíbrio e segurança para o sistema elétrico.

Assim, o Rio Grande do Sul (RS), que já conta com quase 20 anos de experiência no setor, conforme mostra a evolução na Figura 1, tendo seu primeiro parque eólico instalado em 2006 com uma potência de 150 Megawatts (MW), e hoje contando com mais de 2 GW eólicos instalados (ANEEL, 2025), representando, em 2023, 21% da matriz elétrica do estado (EPE, 2024), se destaca: com ampla margem de conexão, infraestrutura consolidada, know-how acumulado e complementaridade entre o regime de geração eólica e solar, desponta como polo seguro e estratégico para o crescimento sustentável do setor e para a continuidade da transição energética.

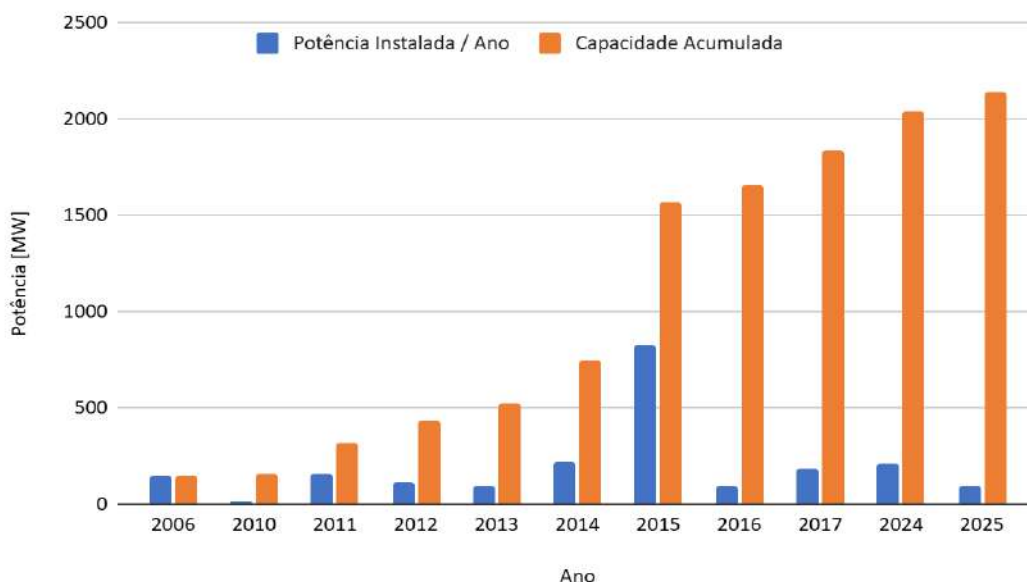


Figura 1: Evolução da potência instalada de parques eólicos no RS. Fonte: Autores, com base nos dados ANEEL, 2025.

Mais do que uma nova fronteira eólica, o estado pode ser elemento-chave instantâneo na manutenção da indústria nacional, geração de empregos e viabilização de cargas futuras eletrointensivas, como datacenters, hidrogênio e fertilizantes de baixo carbono.

Do ponto de vista de datacenters, o estado demonstra claramente atributos diferenciados para abrigar empreendimentos de alta intensidade energética e exigência tecnológica. O exemplo mais emblemático é o protocolo de intenções assinado entre o governo do Rio Grande do Sul e a Scala Data Centers para a construção da Scala AI City, projeto com investimento inicial de R\$ 3 bilhões para sua primeira fase, a ser implantado em Eldorado do Sul, Região Metropolitana de Porto Alegre. Essa primeira fase prevê uma capacidade de 54 MW de TI, e o campus completo tem potencial para alcançar 4,75 GW de capacidade instalada. Além disso, o projeto será conectado ao cabo submarino Malbec, que confere baixa latência e conectividade global essencial, e o local foi escolhido por sua abundância de espaço, proximidade de centros urbanos, oferta consolidada de energia elétrica renovável, segurança frente a desastres naturais, e infraestrutura física e logística favoráveis, todos fatores que reduzem os custos de implantação e operação de datacenters (Governo RS, 2024).

Já pelo lado do hidrogênio verde, o estado possui condições favoráveis para desenvolver amônia verde e fertilizantes de base hidrogênio, com vistas ao consumo interno, dado o porte agrícola do Rio Grande do Sul e a sua matriz elétrica renovável. A produção de hidrogênio verde para utilização em síntese de amônia permitiria reduzir importações e dependência externa, ao mesmo tempo que alinha o setor agrícola a cadeias de menor carbono, especialmente considerando que o Brasil importou em 2023 cerca de 86% dos fertilizantes que consumiu (CNN, 2024).

2. METODOLOGIA

Este estudo baseia-se em uma análise estratégica da competitividade regional da energia eólica no Brasil, com foco no estado do Rio Grande do Sul. Foram utilizadas três abordagens complementares:

Análise documental e regulatória: Consulta a bases públicas como o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), especialmente dados dos mapas de margem de conexão, matriz elétrica regional, painéis de PLD horário e o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2034).

Modelagem comparativa de atributos regionais: Avaliação qualitativa e quantitativa dos fatores críticos à viabilização de projetos eólicos, como disponibilidade de margem no SIN, risco de curtailment, custo de conexão (TUST), infraestrutura logística, sinergia com o submercado Sudeste e perfil horário de geração.

Estudos de caso e dados proprietários: Foram considerados gráficos e simulações extraídos do acervo do autor, incluindo análise de preços horário de energia, curvas de geração eólica, e o impacto regional no escoamento de energia. Além disso, exemplos reais de ativos resilientes foram analisados para evidenciar o papel do estado na mitigação de riscos operacionais e regulatórios.

A triangulação dessas fontes permitiu uma avaliação robusta do papel estratégico do Rio Grande do Sul como vetor de equilíbrio e segurança na expansão renovável do Brasil.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Margem de Conexão, Infraestrutura e Potencial Eólico

A expansão sustentável das fontes renováveis exige, além de bons recursos naturais, capacidade real de integração ao SIN. O estado do Rio Grande do Sul destaca-se nesse aspecto ao apresentar, segundo dados do ONS (2025), diversas subestações com margem disponível para o curto, médio e longo prazo (2025-2029+), estrategicamente localizadas próximas a regiões com projetos eólicos, conforme Figura 2.

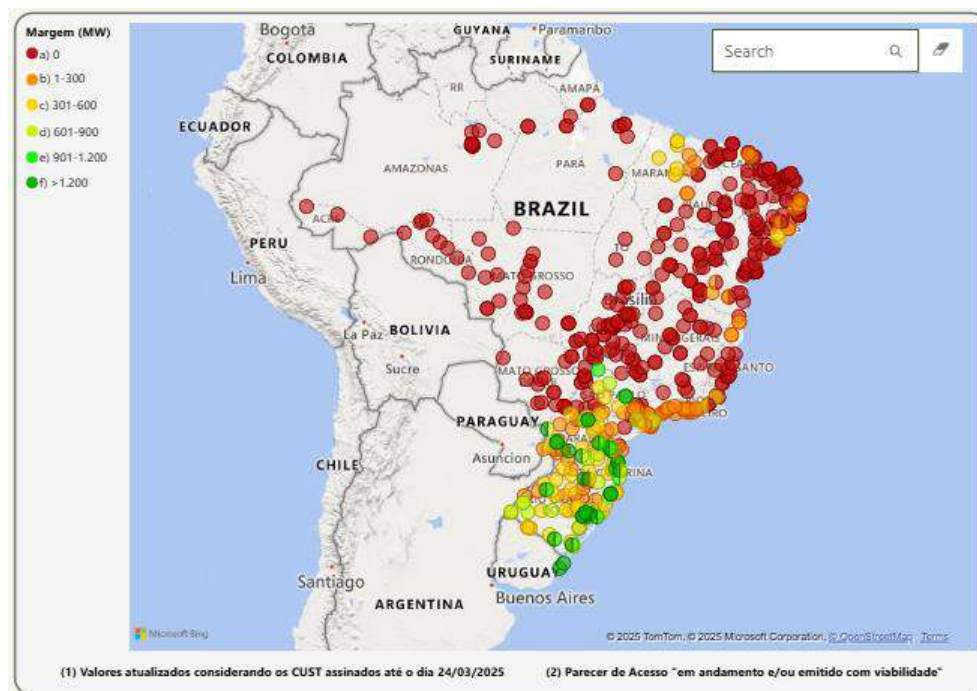


Figura 2: Margens de conexão disponíveis no Brasil com horizonte em 2025, atualizado em 31/03/2025. Fonte: ONS (2025).

Nas regiões de alto potencial eólico há, aproximadamente, 14 GW de margem disponível para conexão em níveis de tensão de 230 quilovolts (kV) e 525 kV, conforme apresentado na Tabela 1. É importante destacar que essa capacidade não é completamente independente entre as subestações. Existe uma sinergia no SIN, o que significa que a ocupação da margem em uma subestação pode impactar a disponibilidade em outra, devido à interdependência das malhas elétricas. Portanto, os 14 GW indicados refletem a capacidade disponível em cada subestação de forma isolada, sem considerar eventuais restrições ou sobreposições decorrentes dessa interconexão.

Tabela 1: Margem de conexão disponível no RS atualizada em 31/03/2025. Fonte: ONS (2025).

Subestação	Tensão (kV)	Margem 2025 (MW)
Alegrete 2	230	825
Bagé 2	230	350
Livramento 2	230	450
Presidente Médici	230	510
Quinta	230	550
Uruguaiana	230	675
Uruguaiana 5	230	325
Livramento 3	230	500
Cerro Chato	230	225
Povo Novo	230	1.150
Osório 3	230	325
Candiota 2	230	1.050
Povo Novo	525	2.000
Marmeleiro 2	525	1.850
Santa Vitória do Palmar 2	525	1.650
Candiota 2	525	2.000
TOTAL	-	14.435

Essa margem representa uma vantagem competitiva concreta, permitindo que novos projetos sejam conectados com planejamento, menor disputa por capacidade ou necessidade de reforços estruturais. Além disso, os estudos de planejamento da EPE realizados em 2024 visam possibilitar o aumento da capacidade de importação da região Sul em até 4 GW, com escalonamento da solução em duas etapas, sendo 2 GW a partir de 2032 e 2 GW a partir de 2036 (EPE, 2024), o que reforça sua posição como hub de equilíbrio para o sistema elétrico nacional.

Do ponto de vista logístico, o estado conta com uma infraestrutura rodoviária consolidada, conforme Figura 3, com destaque para as BRs 116, 290, 293 e 471, que conectam as principais jazidas eólicas ao Porto de Rio Grande, ponto de entrada estratégico no estado. Essa malha viária asfaltada e com capacidade para transporte especial favorece a mobilização de grandes equipamentos eólicos, reduzindo prazos e custos logísticos.



Figura 3: Rodovias do Rio Grande do Sul. Fonte: DAER, 2023.

A Figura 4 apresenta o potencial eólico anual do estado a 150 metros de altura (Governo – RS, 2014). Observa-se que as principais jazidas eólicas se concentram em duas regiões estratégicas: a faixa de fronteira sudoeste, entre Brasil, Argentina e Uruguai, e o litoral sul do estado. Essas áreas reúnem ventos consistentes e de alta intensidade, que resultam em fatores de capacidade elevados, favorecendo o desenvolvimento de empreendimentos com maior produtividade e competitividade econômica, além de serem compostas, majoritariamente, por terrenos planos, que diminuem a complexidade do projeto e da instalação.

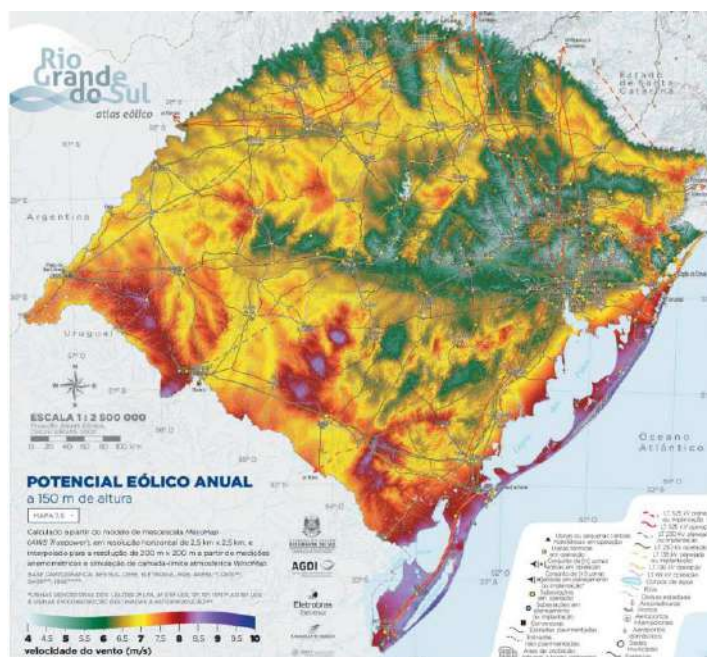


Figura 4: Potencial Eólico do Rio Grande do Sul. Fonte: Governo - RS, 2014.

3.2. Complementariedade Eólica-Solar e Perfil Horário de Produção

A expansão da geração renovável no Brasil impõe ao sistema elétrico o desafio de lidar com a intermitência e a concentração horária da produção de energia, muitas vezes divergente do consumo. Com o crescimento contínuo da participação da geração distribuída solar, projeta-se um aumento ainda maior na complexidade operacional, exigindo uma limitação adicional da geração centralizada para assegurar a confiabilidade e ajustar os recursos de geração à demanda líquida instantânea. Para ilustrar esse fenômeno, a Figura 5 a seguir apresenta a necessidade de restrição na geração (curtailment) das usinas eólicas e fotovoltaicas centralizadas em 11 de agosto de 2024, data de menor demanda líquida registrada no SIN, destacando que a geração distribuída (MMGD) não foi impactada por essas restrições.

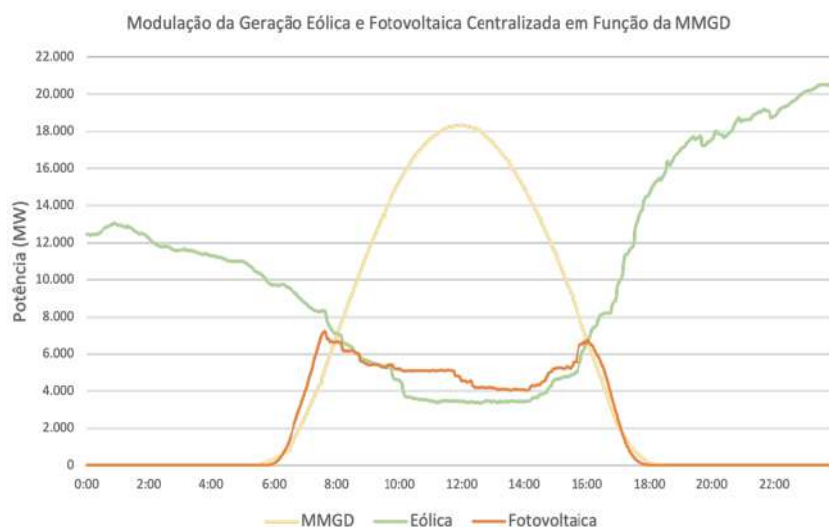


Figura 5: Modulação da Geração Eólica e Fotovoltaica Centralizada em Função da MMGD. Fonte: ONS - PAR/PEL 2024.

Este estudo, contudo, não se propõe a analisar os impactos da MMGD no SIN, mas sim a explorar a contribuição potencial do Rio Grande do Sul para a cadeia da energia eólica. A partir da Figura 5, observa-se não apenas o curtailment, mas principalmente a complementaridade entre os perfis de geração: enquanto a energia solar apresenta maior produção durante o dia, a energia eólica em algumas regiões tende a ter sua geração concentrada no período noturno.

Nesse contexto, a geração eólica no Rio Grande do Sul apresenta um perfil complementar ao da energia solar, com maior produção nos períodos iniciais e finais do dia — justamente fora dos horários de pico da geração fotovoltaica. Esse comportamento contribui para o equilíbrio do SIN, ao alinhar-se de forma mais próxima com a curva de demanda (ver Figura 7), aumentando o valor sistêmico da fonte eólica nos próximos anos. A partir da consolidação dos dados de geração horária de todas as usinas eólicas operacionais no estado (ONS, 2025), foi elaborado o gráfico da Figura 6, que apresenta a média da geração horária ao longo dos anos de 2020 a 2024.

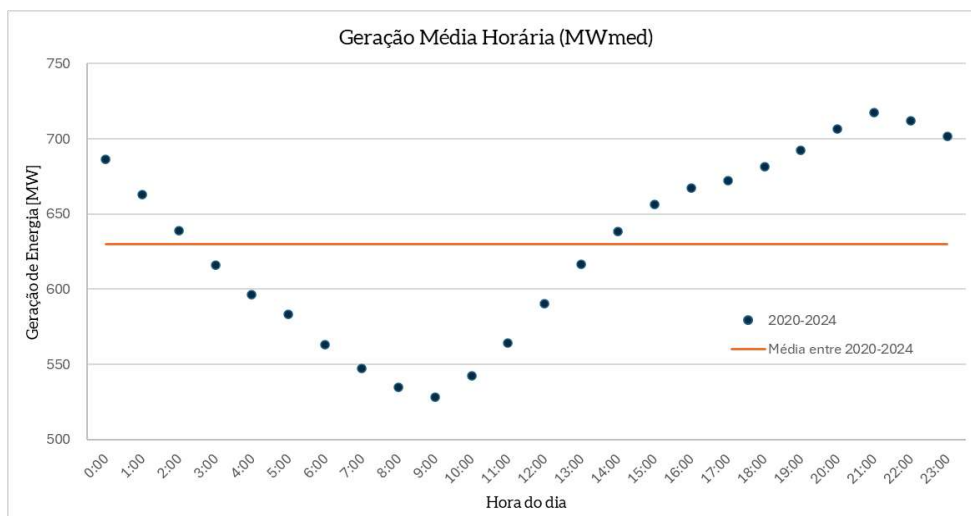


Figura 6: Gráfico de Geração Média Horária Eólica no Rio Grande do Sul. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na avaliação sob a ótica da carga, com base no PAR/PEL 2024 — que apresenta o plano da operação elétrica de médio prazo do SIN —, prevê-se um incremento significativo na carga global noturna por volta das 20h, da ordem de 15 GW até 2029, em comparação a 2024 (ONS, 2024). Simultaneamente, espera-se que a carga líquida nos horários diurnos, próximos ao meio-dia, seja majoritariamente suprida pela MMGD, intensificando o fenômeno conhecido como “curva do pato”. Esse cenário aponta para uma tendência de preços de energia mais baixos durante o dia e mais elevados à noite, favorecendo economicamente as usinas eólicas, cujo perfil de geração se concentra fora do pico solar.

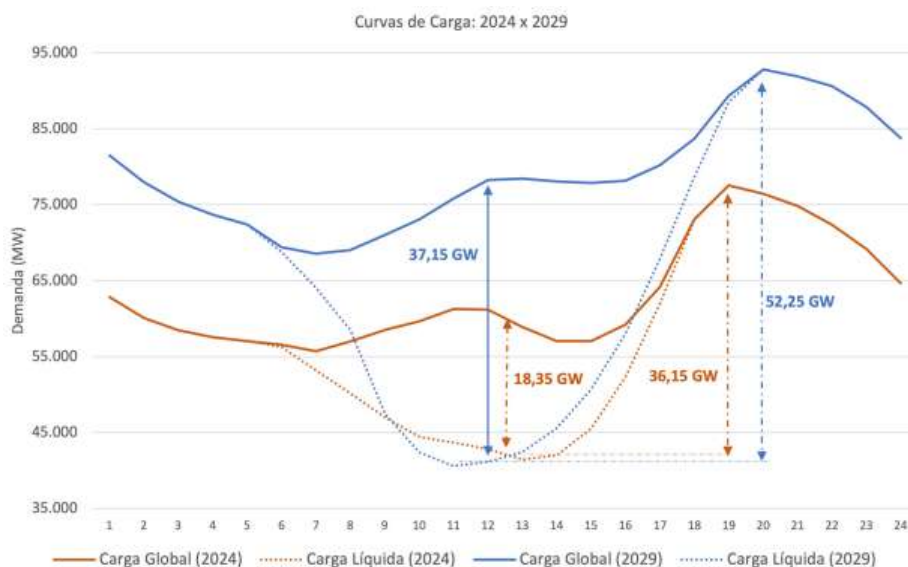


Figura 7: Comparação entre as Curvas Horárias das Cargas Global e Líquida do SIN Verificadas em 2024 e Previstas para um Domingo em 2029. Fonte: ONS – PAR/PEL, 2024.

Também foi avaliado o comportamento do Preço de Liquidação de Diferenças (PLD) no dia 29 de março de 2025 (CCEE, 2025). A partir dessa análise, foi produzido o gráfico da Figura 8, com os seguintes destaques:

- **Submercado Sul:** o PLD horário apresentou um perfil semelhante ao da carga líquida observada na Figura 5. Esse comportamento favorece a rentabilidade dos ativos eólicos localizados no Rio

Grande do Sul e expostos ao PLD, especialmente quando comparados aos do Submercado Nordeste.

- **Submercado Nordeste:** o PLD permaneceu próximo ao valor mínimo (piso) durante praticamente todo o dia, o que desfavorece economicamente os empreendimentos solares e eólicos expostos ao mercado de curto prazo.

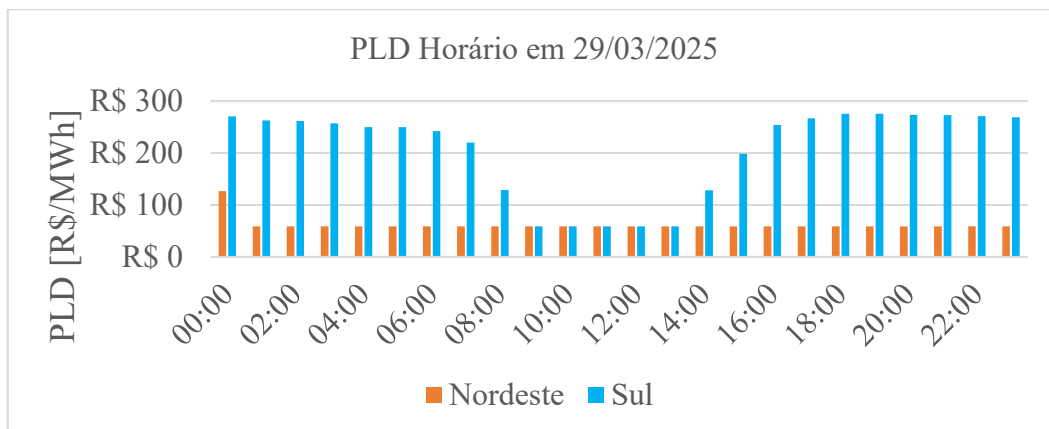


Figura 8: PLD horário em 29/03/2025 nos Submercados Sul e Nordeste. Fonte: Elaborado pelo Autor, 2025.

3.4. Custo de Conexão Competitivo

Segundo o Plano Decenal de Energia 2034 da EPE, as projeções de TUST Geração para o Submercado Sul em 2034 indicam um valor de apenas R\$ 4,04/kW.Mês. Em contraste, o custo de conexão projetado para o Nordeste é de R\$ 9,58/kW.Mês, conforme Figura 9.

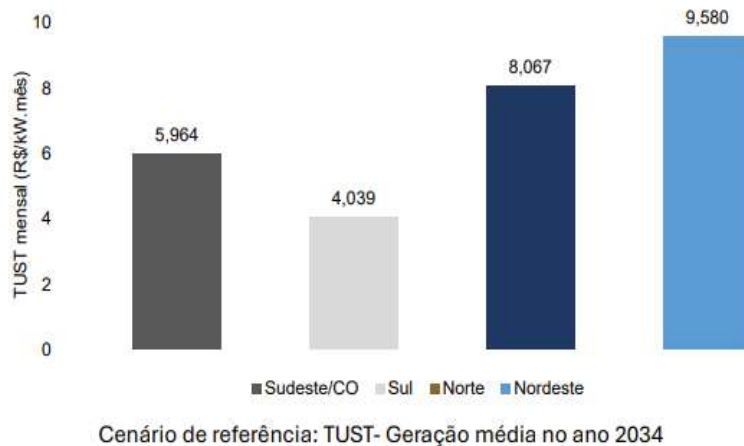


Figura 9: Projeção de TUST geração em 2034. Fonte: EPE, 2024.

3.5. Sinergia com o Submercado Sudeste e Previsibilidade de Receitas

A escolha da localização de um projeto eólico no Ambiente de Comercialização Livre (ACL) está associada à previsibilidade de receita proveniente da venda de energia. A alta correlação histórica de preços entre os submercados Sul e Sudeste, apresentada na Tabela 2, elaborada a partir de dados da CCEE (2025), desponta como um importante atributo de mitigação de risco para ativos instalados no Rio Grande do Sul, tornando a estratégia de alocação e diversificação mais previsível e segura para investidores.

Tabela 2: Média de PLDs semanais. Fonte: CCEE (2025).

SUBMERCADO	SUDESTE	SUL	NORDESTE	NORTE
PREÇO MÉDIO EM 2024 [R\$/MWh]	129,86	129,87	120,11	130,76
PREÇO MÉDIO 5 ANOS [R\$/MWh]	143,32	144,97	130,66	138,51

Essa correlação favorece a comercialização com consumidores do Sudeste, principal centro de carga e consumo industrial do país, ao reduzir a exposição a distorções significativas de preços. Além disso, contribui para a construção de estratégias de hedge e para uma alocação mais eficiente de portfólios, ampliando as oportunidades para novos contratos de energia estruturados com consumidores localizados na região.

3.6. Risco de Curtailment e Segurança Operacional no Escoamento

O curtailment tornou-se um dos principais desafios do setor elétrico brasileiro. O Rio Grande do Sul, por outro lado, apresenta uma configuração estrutural distinta. Por ser um estado importador de energia, com centros de carga relevantes e planejamento de ampliação da capacidade de importação nos próximos anos (EPE, 2024), o risco de curtailment por razão energética tende a ser relativamente menor. Ainda que, no contexto do SIN, os efeitos desse tipo de restrição sejam compartilhados entre as regiões, o que pode implicar repasses de impactos, a estrutura de consumo e o perfil de carga local contribuem para mitigar a exposição direta do estado a esse risco.

Em um estudo interno realizado pelo autor a partir de dados públicos do ONS sobre curtailment entre os anos de 2022 e 2024, o RS foi um dos estados menos afetados, com menos de 1% do total limitado, conforme Figura 10.

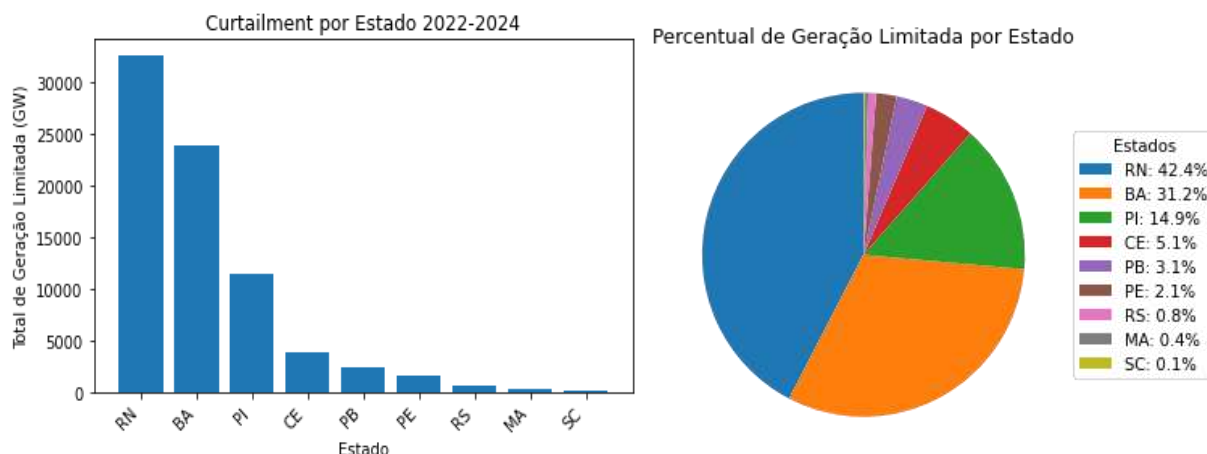


Figura 10: Comparativo de curtailment entre diferentes estados. Fonte: Elaborado pelo autor.

Ademais, casos reais corroboram e evidenciam esse contraste. Em levantamento recente, observou-se no material de divulgação de resultados da AES Brasil (AES Brasil, 2024), que a Usina Eólica Cassino, única do portfólio localizada no Rio Grande do Sul, não sofreu perdas significativas por curtailment, ao passo que ativos em outras regiões apresentaram cortes de produção superiores a centenas de GWh em 2024, conforme Figura 11.

Indicadores Operacionais	3T23	3T24	Var (p.p. ou %)	9M23	9M24	Var (p.p. ou %)
Curtailement³ (GWh)	99,3	378,6	281,3%	125,2	487,8	289,7%
Alto Sertão II	13,5	71,5	429,3%	22,5	104,3	363,6%
Ventus	25,0	38,0	52,1%	29,9	54,8	83,6%
Mandacaru	2,0	28,1	1.283,9%	3,1	29,3	847,5%
Salinas	5,5	23,4	324,2%	6,0	30,0	402,8%
Ventos do Araripe	3,8	20,5	442,9%	10,8	25,1	131,8%
Caetés	6,4	21,3	230,9%	8,9	26,4	196,1%
Cassino	0,6	0,5	-16,0%	0,7	0,6	-8,8%
Tucano	15,6	6,5	-58,1%	16,4	8,4	-48,7%
Cajuína	26,9	168,8	527,5%	26,9	208,8	676,2%

Figura 11: Impacto do curtailement no portfólio eólico da AES Brasil. Fonte: AES Brasil (2024).

Ao avaliar o Rio Grande do Norte como um dos estados mais afetados pelo curtailement, com base nos dados públicos disponibilizados pelo ONS, como o Mapa de Margens de Conexão e o Mapa de Matriz Elétrica e Carga (ONS, 2025), observa-se uma grande assimetria entre geração e consumo, conforme Figura 12. Ainda que, do ponto de vista técnico, a divisão física por estados tenha importância limitada no contexto do SIN, sendo mais relevante a distribuição espacial da geração e da carga ao longo da malha elétrica, opta-se por manter a análise conforme apresentada pelo próprio ONS, que organiza os dados por unidade federativa.

Nessa abordagem, o Rio Grande do Norte se destaca por apresentar uma capacidade instalada projetada de geração superior a dez vezes sua demanda máxima de carga, o que amplia substancialmente o risco de curtailement e impõe desafios à implantação de novos empreendimentos de geração centralizada na região.

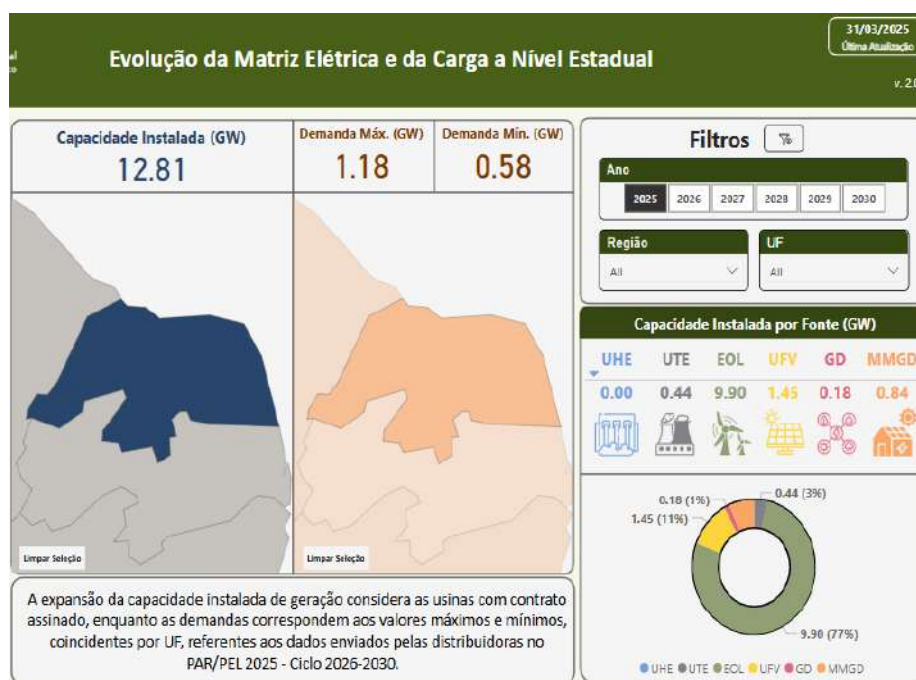


Figura 12: Capacidade Instalada x Demanda no Rio Grande do Norte. Fonte: ONS (2025).

4. CONCLUSÕES

A concentração da geração longe dos centros de carga, a saturação regional das redes de escoamento e a produção de energia desalinhada com os perfis de carga são desafios que, se não endereçados, poderão comprometer a sustentabilidade do setor elétrico no longo prazo. Assim, o Rio Grande do Sul se consolida como uma alternativa estratégica para novos empreendimentos eólicos, com ampla margem de conexão, infraestrutura logística consolidada, menor risco de curtailment, custo de conexão competitivo e alta sinergia com os centros consumidores do Sudeste. O estado pode exercer um papel central na preservação da indústria eólica nacional, na geração de empregos e na atração de novas indústrias limpas, como datacenters e plantas de hidrogênio e fertilizantes de baixo carbono. A continuidade da construção de uma matriz elétrica robusta e descarbonizada dependerá da capacidade do país de diversificar geograficamente seus ativos, dando o sinal locacional correto, e o Rio Grande do Sul está pronto para contribuir com o fortalecimento do setor eólico nacional.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL: Matriz elétrica brasileira. Brasília: ANEEL, 2025. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoieNGE3NjVmYjAtNDYkZC00MDY4LTliNTItMTVhZTU4NWYzYzFmIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 15 de junho de 2025.

AES BRASIL ENERGIA S.A. Release de resultados do 3º trimestre de 2024 (3T24). São Paulo, 30 out. 2024.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE. Relatório de preços PLD horário: 2024-2025. São Paulo: CCEE, 2025. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal>. Acesso em: 18 maio 2025.

CNN BRASIL. Brasil tem seis projetos com potencial para reduzir dependência externa de fertilizantes. São Paulo, 15 abr. 2023. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/brasil-tem-seis-projetos-com-potencial-para-reduzir-dependencia-externa-de-fertilizantes>. Acesso em: 15 set. 2025.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM - DAER. Mapas Rodoviários do RS. 2023. Disponível em: Mapas Rodoviários do RS - DAER-RS. Acesso em: 05 julho 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Balanço Energético Nacional 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 17 julho 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2034. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes>. Acesso em: 18 maio 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. Mapa de margens de conexão: relatório técnico 2025. Rio de Janeiro: ONS, 2025. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/operacao/planejamento>. Acesso em: 18 maio 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Geração média diária e horária. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-media-diaria-horaria.aspx>. Acesso em: 15 jun. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. Diagnóstico e perspectiva da evolução dos cortes de geração no Brasil. Relatório Técnico RT ONS DGL 0189/2025. Grupo de Trabalho Cortes de

Geração. Maio de 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. Sumário executivo – PAR/PEL 2024: plano da operação elétrica de médio prazo do SIN – ciclo 2025–2029. Rio de Janeiro: ONS, 2024.

RIO GRANDE DO SUL. Governo do Estado. Com investimento inicial de R\$ 3 bilhões, Governo do RS e Scala Data Centers assinam acordo para o maior projeto de infraestrutura de datacenters da América Latina. Porto Alegre: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2024. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/com-investimento-inicial-de-r-3-bilhoes-governo-do-rs-e-scala-data-centers-assinam-acordo-para-o-maior-projeto-de-infraestrutu>. Acesso em: 15 set. 2025.

RIO GRANDE DO SUL. SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO E PROMOÇÃO DO INVESTIMENTO; AGÊNCIA GAÚCHA DE DESENVOLVIMENTO E PROMOÇÃO DO INVESTIMENTO – AGDI. Atlas Eólico do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: SDPI/AGDI, 2014. Disponível em: <https://desenvolvimento.rs.gov.br/rio-grande-do-sul-lanca-novo-atlas-eolico>. Acesso em: 15 jun. 2025.