

**CATEGORIA 2**

# Novas Tecnologias



## Implementation of an Artificial Intelligence supported marine mammal acoustic detection system during installation of an offshore wind farm

Stephanie D Milne

Tetra Tech

stephanie.milne@tetrattech.com

### RESUMO

A instalação de fundações em parques eólicos offshore envolve o uso de cravação de estacas, durante a qual os níveis de som produzidos têm o potencial de impactar espécies marinhas protegidas, como mamíferos marinhos, conforme determinado por agências reguladoras ambientais nos Estados Unidos (EUA). Como resultado dessa determinação, o monitoramento visual e acústico deve ser realizado por Observadores de Espécies Protegidas (PSOs) certificados e aprovados pela agência, para identificar quaisquer animais na área e, em seguida, implementar ações de mitigação para reduzir ou eliminar os impactos potenciais quando essas operações forem realizadas. Para cumprir os requisitos do licenciamento de monitoramento acústico para as espécies de mamíferos marinhos conhecidas por estar presentes no Atlântico, a Tetra Tech implantou boias acústicas que processavam os dados a bordo da boia usando Inteligência Artificial (IA) apoiada por detectores para sete tipos de vocalizações de mamíferos marinhos. Os dados foram transmitidos quase em tempo real para operadores em terra de Monitoramento Acústico Passivo (PAM) usando uma conexão via satélite Iridium. Os dados transmitidos incluíam espectrogramas e arquivos de som que permitiam aos analistas validar as detecções de mamíferos marinhos ou confirmar a presença de uma detecção falsa desencadeada por outros ruídos biológicos ou não biológicos. Dados acústicos das boias implantadas em duas diferentes áreas de parques eólicos no Atlântico, durante vários anos, foram analisados, e foi confirmado que múltiplas espécies, incluindo baleias sei, baleias jubarte e baleias-francas-do-Atlântico-Norte (NARW), foram detectadas em tempo real pelos sistemas. De forma única, também há um grande volume de monitoramento visual e dados de detecção visual de mamíferos marinhos coletados durante o mesmo período por PSOs posicionados offshore para considerar ao avaliar os dados acústicos coletados. Muitas adaptações foram feitas nas boias acústicas ao longo de seu período de implantação para melhorar a transmissão de dados, otimizar o consumo de energia e aumentar a eficiência operacional. Essas lições são diretamente aplicáveis para apoiar operações no Brasil para energia eólica offshore, já que as espécies e condições ambientais são idênticas ou semelhantes e ambos os países empregam estratégias similares para mitigar impactos potenciais às espécies marinhas protegidas durante operações da indústria offshore.

**Palavras-chaves:** espécies protegidas, mamíferos marinhos, monitoramento acústico, aprendizado de máquina, inteligência artificial, monitoramento ambiental marinho, mitigação de impactos

## ABSTRACT

Installation of foundations on offshore wind farms involves the use of pile driving, during which the sound levels produced have the potential to impact marine protected species, like marine mammals, as determined by environmental regulatory agencies in the United States (U.S.). As a result of this determination, visual and acoustic monitoring must be performed by certified, agency approved Protected Species Observers (PSOs) to identify any animals in the area and then implement mitigation actions to reduce or eliminate the potential impacts when these operations are undertaken. To fulfill the acoustic monitoring permit requirements for the marine mammal species known to be present in the Atlantic, Tetra Tech deployed acoustic buoys that processed data on board the buoy using Artificial Intelligence (AI) supported by detectors for seven types of marine mammal vocalizations. Data was transmitted in near real time to shore-based Passive Acoustic Monitoring (PAM) Operators using an iridium satellite connection. Data transmitted included both spectrograms and sound files which allowed the Analysts to validate marine mammal detections or confirm the presence of a false detection triggered by other biological or non-biological noise. Acoustic data from the deployed buoys on two different Atlantic wind farm areas for multiple years have been analyzed, and it has been confirmed that multiple species including sei whales, humpback whales and North Atlantic right whales (NARW) were detected in real time by the systems. Uniquely, there is also a large volume of visual monitoring and visual marine mammal detection data collected during the same period by PSOs stationed offshore to consider when evaluating the acoustic data collected. Many adaptations were made to the acoustic buoys throughout their deployment to improve data transmission, optimize energy consumption and increase operational efficiency. These lessons are directly translatable to supporting operations in Brazil for offshore wind, as the species and environmental conditions are identical or similar and both countries employ similar strategies to mitigate potential impacts to marine protected species during offshore industry operations.

**Keywords:** protected species, marine mammals, acoustic monitoring, machine learning, artificial intelligence, marine environmental monitoring, impact mitigation

## 1. INTRODUÇÃO

Marine protected species monitoring and mitigation has been a requirement in many areas of the world including the United States (U.S.) and Brazil for certain offshore and coastal operations such as energy exploration surveys and marine construction, including offshore wind farm construction, where one of the purposes of the monitoring conducted is to mitigate for potential impacts to species from sound exposure. The zones that must be monitored during these sound-producing activities are often calculated for different species and species groups based upon the sound level at which those taxa might be impacted, where both more acute physical impacts as well as behavioral and population impacts might be considered in the determinations. At the most simplified level, louder marine operations, like pile driving for installation of offshore wind turbines, are usually assessed as having the potential for impacts to animals inside larger zones and therefore requires implementation of monitoring methodologies capable of identifying those species of concern inside large offshore monitoring zones. Recent research has shown that incorporation of AI detection algorithms in PAM systems facilitates monitoring of large zones and real-time processing of extremely large acoustic datasets to maximize detection capabilities (Gervaise et al. 2021). Additionally,

the AI provides enhanced capability to identify multiple species' cues simultaneously, which is critical for monitoring of large ocean environments with multiple species of concern like the Atlantic Ocean (Van Parijs et al. 2023).

## Marine Protected Species Permit Compliance Requirements

Historically the U.S. and Brazil have applied similar approaches to the mitigation of potential impacts to marine species from industry operations, with some of the more globally stringent regulations. For example, both Brazil and the U.S have implemented protected species monitoring and mitigation requirements for seismic survey operations using airguns; operations both countries identified as having a higher potential for impact to marine species given the characteristics of the sound produced.

In the U.S., The Biological and Conference Opinion on Bureau of Ocean Energy Management and Bureau of Safety and Environmental Enforcement's Oil and Gas Program Activities in the Gulf of America (May 15, 2025) includes Seismic Survey Mitigation and Protected Species Observer Protocols that apply to marine species in the Gulf that are protected under the Endangered Species Act (ESA) and all marine mammals which are protected under the Marine Mammal Protection Act (MMPA). Brazil's environmental agency, Brazilian Institute of the Environment and Renewable Natural Resources, IBAMA, has implemented requirements for protected species during seismic surveys, in the Monitoring Guidelines for Marine Biota in Seismic Surveys (2018). Both countries regulations include a significant reliance on real-time acoustic monitoring for marine mammal species in addition to the visual monitoring performed by trained Protected Species Observers (PSOs) / Marine Mammal Observers (MMOs). The monitoring is performed to identify the presence of marine species and then mitigation strategies like delaying the activation of the sound sources or shutting down the sound source are executed to minimize the impacts to the animals. This differs from other areas of the world where there is less focus on real-time detection and mitigation and instead strategies like sound deterrents are used.

If the approach to regulation of offshore wind construction and protected species monitoring and mitigation requirements in Brazil are developed like those in place for other existing operations, it is expected that they will be similarly reflective of those that currently apply to offshore wind construction in the U.S.

## Marine Mammal Species

There is significant overlap in the species composition and mitigation priorities for marine mammals and endangered species of both the Atlantic US and Brazil. Both countries list Blue whales (*Balaenoptera musculus*), Sei whales (*Balaenoptera borealis*), Minke whales, common and Antarctic (*Balaenoptera acutorostrata*, *Balaenoptera bonaerensis*), Fin whales (*Balaenoptera physalus*) and several species of delphinids as species of concern per the International Union for Conservation of Nature (IUCN) defined Red List Criteria. The North Atlantic right whale (NARW), found in Atlantic US is IUCN listed as Critically Endangered and while the Southern right whale (*Eubalaena australis*) is not IUCN listed, they are classified on Brazil's national Red List of Threatened Fauna (2014).

## Permit Requirements for Acoustic Monitoring During Offshore Wind Construction

At the time that this paper was written typical MMPA permit requirements for acoustic monitoring for marine mammals during U.S offshore wind farm construction requires that:

PAM Operators monitor marine mammals 60 minutes prior to, during, and 30 minutes following all pile-driving. PAM data must be transmitted in real-time to PAM Operators, PAM must be conducted for at least 24 hours immediately prior to pile driving activities, and PAM Operators are required to review all detections from the previous 24-hour period for situational awareness; PAM systems must be able to detect NARWs 10 km from the pile being driven. While not required, the PAM system should also detect other marine mammals. Monitoring zones for other species are smaller and based upon modeled impact zones for those

species, established based upon the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (2024).

### Approval of a PAM Plan

While the MMPA and other federal permits outline the higher-level requirements for protected species monitoring and mitigation during construction, the MMPA permits also stipulate that a PAM Plan must be developed and approved by all relevant regulatory agencies. This PAM Plan must outline the specific details of how each element of the permit acoustic monitoring will be executed. These plans are highly detailed and typically involve many rounds of consultation with agencies to respond to their comments and amend the PAM Plan accordingly. Important components of the function of a PAM system are mandated by the agencies at this stage of the process, many of which can greatly impact operations and costs to the project. Examples of the types of PAM system requirements that are defined at this stage include:

- Identification of all the specific locations at which PAM systems will or may be deployed
- Parameters, thresholds and performance, including percentage of false detections of detection of all marine mammal detectors, where the performance of some detectors is evaluated using an annotated dataset for that species
- System functionality confirmation processes and quality assurance processes
- The rate at which data transmissions that will occur to meet the requirement of “real-time”
- The species-specific length of audio files and size (frequency range) of spectrograms that will be transmitted for each detected marine mammal vocalization; and
- Validation of the proposed detection range of each buoy through modeling which incorporated parameters including the WDA-specific sediment type, water depth, season, and vocalization source level at a wide range of the expected background noise levels

## 3. METODOLOGIA

### Summary of TetraTech’ s Technical Approach

TetraTech deployed a series of moored buoys throughout the required Wind Development Area (WDA), each configured with a broadband hydrophone. This PAM system employs an AI neural network, developed by CHORUS and provided commercially by SenSeaFR with species-specific detectors, and the system alerts remotely located PAM Operators to potential marine mammal vocalizations when encountered. The PAM Operators analyzed the transmitted spectrograms and audio file, and the PAM Operator confirmed or rejected the detection. By reducing the overall data to be analyzed, relative to a traditional PAM system, the PAM operator can manage and assess data from multiple systems without the data becoming unmanageable. . This marked increase in efficiency via AI-powered data pre-screening substantially reduces the labor hours required to perform acoustic monitoring of large zones, and thus reduces overall costs associated with the environmental compliance scope for offshore construction.

Tetra Tech performed an analysis of the size of each of the WDAs in which construction would occur and proposed a sufficient number of buoys to (1) achieve the regulatory-required 10 km PAM monitoring zone around each pile site, (2) provide sufficient back-up buoys in the event of any failures and (3) minimize the need to relocate buoys during a season of piling operations.

A combination of buoys, ranging from 4 to 7 units, was active during piling, recording continuously and transmitting potential detections to PAM Operators. The active buoys were selected around each active piling site such that a 10 kilometer monitoring zone was achieved, while also attempting to minimize the number of active buoys concurrently to maximize overall battery life and minimize maintenance requirements for the array. Buoys were relocated throughout the piling season as installation progressed throughout the WDA.

## Marine Mammal Detection AI

The PAM buoys were embedded with classifier algorithms running through SenseaFR's CHORUS AI neural network, also referred to as BioSound. Acquired acoustic data from a broadband hydrophone was automatically processed onboard the buoy in real-time by the embedded version of the neural network. Seven AI supported marine mammal detectors were incorporated to detect narrowband and broadband vocalizations from all Mysticete and delphinid marine mammal species occurring in the WDAs, each with their own distinct vocalization behavior and characteristics.

BioSound can effectively detect dolphins, as well as mysticetes including NARW, blue whale, fin whale, sei whale, and humpback whales. Table 1 provides a list of the species and call types that are detected by the AI detectors along with the parameters of the spectrograms that are provided for each and the length of the wav file that is provided to the Operator for assessment. These parameters were configured during the PAM Plan development and regulatory phase of the projects and are based on the characteristics and patterns of the vocalizations. Regulatory agencies required that a sufficient sized spectrogram and sufficient length wav files are provided to ensure that the Operator can identify the species and/or call type, but where the file size is also restricted to a size that is manageable for transmission without depleting the system's power to a degree that could jeopardize its ability to continuously operate.

*Table 1: Frequency band of specific species and call types analyzed by the PAM system.*

Species / Call Type	Animal's Vocalization Frequency Range (Hz)	Analyzed Frequency Range of Detector (Hz)	Plotted Frequency Range-Pitch tracks (Hz)	Spectrogram Duration (s)	Audio File Duration (s)
Blue, Fin whale – pulse train	15- 25	0 - 50	0- 100	60	60
Blue whale- arch	20- 100	0 - 150	0- 250	16	16
Sei, Blue whale- down sweep	20- 100	0 - 150	0- 250	4	4
NARW- upcall	100- 200	50 - 300	0- 600	8	8
Humpback whale- upsweep	50- 1000	50 -1000	0- 2000	8	8
Delphinid whistle	50- 20,000	50 - 20,000	50- 20,000	2	2

Delphinid click, buzz	50,000- 64,000	20,000- 64,000	50- 64,000	2	2
-----------------------	----------------	----------------	------------	---	---

The AI detection index threshold utilized varies between 0.6 and 1 where a low detection threshold leads to a high probability of detection (and a high probability of false alarm) and a high detection threshold leads to a low probability of false alarm (and a low probability of detection). Given that regulatory agencies were more concerned with the potential for real detections to be missed by the detectors, agencies required that low thresholds be set so that human PAM Operators could review and confirm all potential detections, including ones with a high likelihood of being false (0.6 to 0.7 for whale calls and 0.7 to 0.8 for delphinid calls). Post-hoc data review was performed to examine the rate of false detections forwarded by the AI detectors for each species to support refinement of threshold settings for future projects.

### PAM Operator Acoustic Monitoring Parameters

Acoustic monitoring was performed as described above by remote, shore-based PAM Operators who were approved to support the projects based upon their training and acoustic monitoring experience in both the region in which operations were undertaken and in detecting the species of concern found in that region. Regulatory agencies stipulated the number of Operators required to monitor each system based upon an evaluation of the anticipated volume and complexity of the data that they would review.

Minimum recommendations from NOAA and BOEM (Van Parijs et al. 2021) for use of passive acoustic listening systems in offshore wind energy development were applied, which requires visual review of data of species such as NARWs to ensure accuracy of detections. In near-real-time, PAM Operators monitored the hydrophone and recorder system functionality by reviewing a monitoring portal, Resonance. The buoys were recording and analyzing acoustic data with species-specific classifiers continuously and during periods absent of marine mammal vocalizations, the buoys sent tracking data that confirms system function every 20 minutes, including disk usage, power reserve, GPS position if the buoy is displaced out of the expected zone etc. During periods of possible and active vocalizations, the system also transmitted detection data to the remote PAM operator every 5 minutes.

### Analysis of Acoustic Detection Events of Marine Mammals

Detection events included in the analysis were those that occurred when both visual monitoring was undertaken by PSOs and acoustic monitoring was being undertaken by PAM Operators, hereafter referred to as periods of active monitoring.

Detection events are defined as a series of marine mammal observation cues such as blows, or body parts (visual cues) or whistles, clicks, burst pulses (acoustic cues) that occur continuously within a defined period of time without interruption and can be grouped together as one event (continuous cues associated with delphinid species without any interruption longer than 15 minutes were considered to be one event, continuous cues associated with whale species without any interruption longer than 30 minutes were considered to be one event).

Detection events were analyzed via calculation of the Spearman Correlation Coefficient to assess the relationship between acoustic and visual detections across species using the `spearmanr()` function from the `scipy.stats` package for Python. Detections were aggregated by species or species group, and ranks were assigned to each modality (visual and acoustic) using the `rank()` function from the `pandas` package. Rank differences were then calculated to evaluate the relative effectiveness of each detection modality by species.

Visual and acoustic detection rates for visual and acoustic monitoring were calculated for active monitoring periods where one hour of acoustic monitoring consisted of PAM Operators monitoring the configuration PAM buoys required to create a 10 km monitoring zone around a pile site and one hour of visual monitoring consisted of the configuration of PSO teams on watch with big-eye binoculars and other visual monitoring equipment on their respective support vessels transiting in their orbit of transect configurations to achieve visual monitoring coverage of a comparable and similar area to the PAM buoys.

## 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### Buoy Operational Period

Several PAM buoys (between four and seven at a time) were deployed in two different WDAs for a total duration of over a year to date, during which time subsets of the buoys were monitored in real-time by PAM Operators for approximately 934 hours across 147 days. Between and during active monitoring periods, data was also recorded continuously on every buoy deployed, where the raw audio data up to the full hydrophone frequency range of 170 kHz was recorded for post processing analysis.

### False Positives Related

Since false detection rates varied dependent on the location, season and environmental and operational conditions that impacted the soundscape around a buoy, a more intensive analysis is still pending, however initial results indicate that for thresholds set to 60% probability, false detections rates were as high as 100%.

### Marine Mammal Detections

Four mysticete species, Humpback whales, Sei whales, NARWs and Minke whales were detected on the deployed PAM systems during active monitoring, Delphinid vocalizations (tonal sounds, clicks and burst pulses) were detected during more than 270 discrete detection events to date. All species of mysticete that were detected visually over the course of all active monitoring periods were also detected acoustically on the PAM system. Calculation of the Spearman Correlation Coefficient across all six species/species groups indicated there was no statistically significant relationship ( $\rho$  [rho] = -0.045;  $p$  = 0.932) between visual or acoustic detections across species. Review of rank differences, however, showed important species-specific differences in relative effectiveness of detection modality. Delphinids were the most frequently detected species and were detectable by both acoustic and visual methods. Sei whales displayed a strong bias towards acoustic detection and had the strongest positive rank differential. Humpback whales also showed a moderate bias for acoustic detection to visual, though less notable than sei whales. North Atlantic right whales and minke whales both displayed higher visual detectability, possibly due to acoustic crypsis near offshore wind projects or increased time spent at the surface facilitating visual detection.

The visual detection rate of delphinids was 0.1627 detection events per hour of monitoring and the acoustic detection rate was 0.2901 detection events per hour of monitoring. Figure 1 depicts the detection rates for all mysticete species detected during active monitoring.

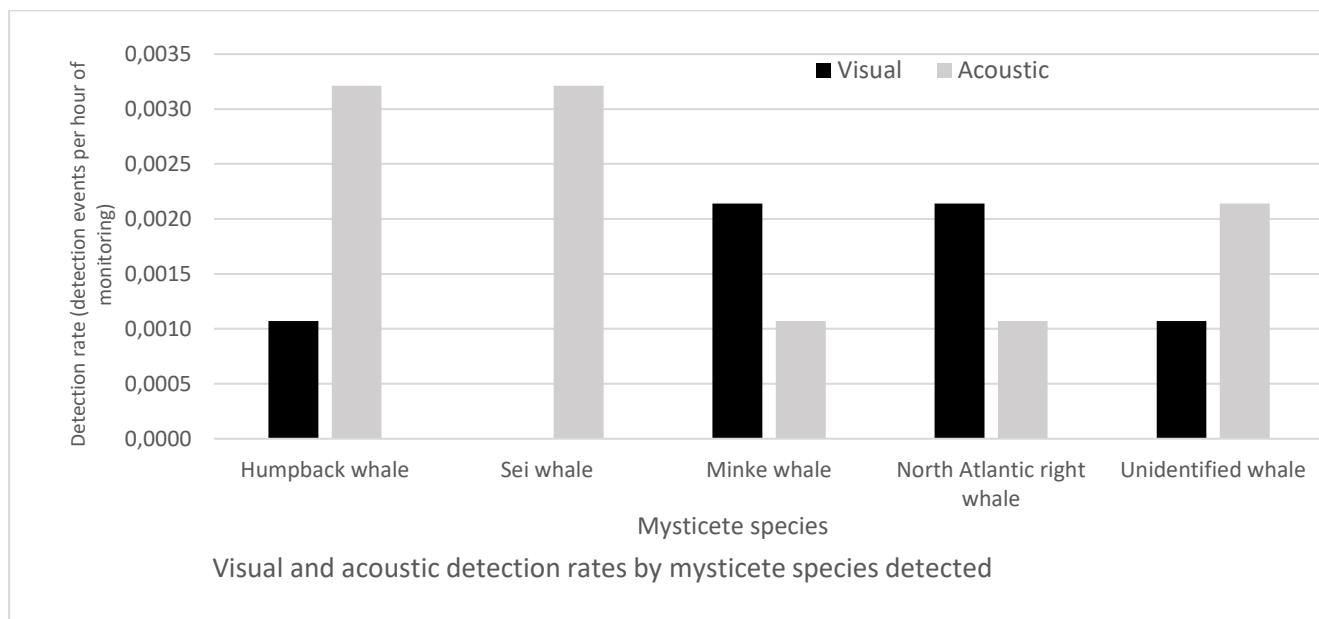


Figure 1: Visual and acoustic detection rates for mysticete species detected during deployments

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### Performance Enhancements for Operational Efficiency and Quality Assurance

A robust support structure that can be available to respond immediately is essential, including outside of typical business hours, when a technology failure has the potential to halt piled-driving operations. On these projects, this entailed a combination of training from the equipment manufacturers and AI development team to the larger operations team, the development and documentation of troubleshooting procedures and the identification of and development of redundant and varied solutions in the event of a failure on an individual buoy. This high extent of support is necessary when PAM interruptions will result in delays not only the pile-driving vessel but to all the associated supporting vessels and personnel. Given that Brazil now requires real-time and continuous acoustic monitoring in addition to visual monitoring during offshore activities that have been identified to have potential to impact marine mammals through the sound produced, it is reasonable to assume that this important operational consideration will also apply to any offshore wind construction activities. This emerging technology is quite new and is being operated under expanded functionality and has not been extensively field-tested, the likelihood of failure increases. Critical improvements that enhanced troubleshooting response time included expanding the types of operations and interventions that could be made remotely from shore-based locations.

Another key improvement that was implemented included re-training the AI detectors to reduce false positives triggered by background noise sources not previously encountered in the original training data sets. This continuous refinement in data processing is an advantage uniquely available to marine mammal detectors that are supported by AI and therefore can learn to recognize or eliminate patterns for species identification. By reducing the rate of false positive detections, data transmission needs and their associated costs are reduced.

Another important operational procedure that was developed was the ability to remotely access and download raw acoustic data from buoys as needed. If a regulatory agency requested access to a larger volume of data than that which is transmitted in real time to a PAM Operator, this data was readily and quickly accessible, providing an important level of quality assurance for the agencies and eliminating the time and associated costs involved in retrieval of the buoy and manual download of data.

## Lessons Learned

Although comprehensive legislation governing marine protected species has existed in the U.S for many years, there is a lack of technical guidance documents that address the execution of many of the field requirements that must be implemented for protected species monitoring and mitigation. These gaps frequently result in misalignment between regulatory agencies and offshore wind developers and their subcontractors with respect to how compliance can best be achieved for various permit requirements. One example that has the potential to critically impact installation operations from both a schedule and cost perspective concerns the requirement to establish a 10 km monitoring zone around each pile site. Currently no guidance from the regulatory agencies exists with respect to the parameters that must be used to determine the acoustic monitoring range of a particular system, and most peer-reviewed publications do not assess or report the detection range of the passive acoustic monitoring equipment used in the study. This is exacerbated by the fact that in an ocean environment detection range varies based on region and even daily and hourly conditions at the site and thus is not constant. Further, there are currently no guidelines that specify what, if any, validation of modeled or predicated detection ranges of systems must be undertaken using field measurements. Successful implementation of a comprehensive protected species monitoring and mitigation program requires that government regulators establish clear parameters for these important components of an acoustic detection system in advance and thus allow developers and technology providers to build the most robust environmental compliance structure to support the project's needs.

## Conclusion

Incorporation of AI detectors into the PAM protocols for U.S. offshore wind construction has allowed for the processing of massive quantities of acoustic data in real-time. In lieu of AI pre-processing, achievement of real-time monitoring would require more human PAM operators per PAM system and real-time transmission of all acoustic data which is costly and introduces unnecessary risk of data transmission problems that can lead to costly delays to installation operations.

Approval of the PAM systems and AI detectors required extensive consultation with environmental regulators to fully explore the functionality and limitations of the systems and led to many last-minute requests for adjustment to the operational parameters of the systems. These adjustments then resulted in technical difficulties during field deployment, set up, and testing, and so it is recommended to avoid altering operational parameters close to field deployment. The provision of specific and clearly defined requirements for PAM system capabilities and any associated modeling and/or equipment validation by environmental regulators is critical to enable developers to better understand the associated costs and to make more informed evaluations of the technical capabilities of their potential supply chain.

In addition, to ensure that the supply chain can support the growth of an offshore wind industry in Brazil, it is important for regulatory agencies to be aware of the capabilities and limitations of the technology that will be essential to support all phases of development and operations.

## REFERÊNCIAS

Biological and Conference Opinion on Bureau of Ocean Energy Management and Bureau of Safety and Environmental Enforcement's Oil and Gas Program Activities in the Gulf of America, NMFS, May 15, 2025

Brazilian Institute of the Environment and Renewable Natural Resources (Ibama). 2018. Monitoring Guidelines for Marine Biota in Seismic Surveys.

Gervaise, C., Simard, Y., Aulanier, F., & Roy, N. 2021. Optimizing passive acoustic systems for marine mammal detection and localization: Application to real-time monitoring north Atlantic right whales in Gulf of St. Lawrence. *Applied Acoustics*, 178, 107949.

Marine Mammal Protected Areas Task Force. "Important Marine Mammal Areas E-Atlas." MMPATP, 2023, [www.marinemammalhabitat.org/imma-eatlas/](http://www.marinemammalhabitat.org/imma-eatlas/).

National Marine Fisheries Service. 2024. Update to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 3.0): Underwater and InAir Criteria for Onset of Auditory Injury and Temporary Threshold Shifts. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-71, 182 p.

NOAA Fisheries. "ESA Section 7 Consultation Tools for Marine Mammals on the West Coast." NOAA, 2024, [www.fisheries.noaa.gov/west-coast/endangered-species-conservation/esa-section-7-consultation-tools-marine-mammals-west](http://www.fisheries.noaa.gov/west-coast/endangered-species-conservation/esa-section-7-consultation-tools-marine-mammals-west).

NOAA Fisheries. "Coastal Virginia Offshore Wind Commercial (CVOW-C) Project Letter of Authorization." NOAA, 2024, [www.fisheries.noaa.gov/s3/2024-02/CVOWC-OWF-IssuedLOA-OPR1.pdf](http://www.fisheries.noaa.gov/s3/2024-02/CVOWC-OWF-IssuedLOA-OPR1.pdf).

Van Parijs, S.M., Baker, K., Carduner, J., Daly, J., Davis, G.E., Esch, C., Guan, S., Scholik-Schlomer, A., Sisson, N.B., & Staaterman, E. (2021). NOAA and BOEM Minimum Recommendations for Use of Passive Acoustic Listening Systems in Offshore Wind Energy Development Monitoring and Mitigation Programs. *Frontiers in Marine Science*, 8(1575). *Frontiers in Marine Science*

Van Parijs, S. M., DeAngelis, A. I., Aldrich, T., Gordon, R., Holdman, A., McCordic, J. A., ... & Davis, G. E. (2025). Establishing baselines for predicting change in ambient sound metrics, marine mammal, and vessel occurrence within a US offshore wind energy area. *ICES Journal of Marine Science*, 82(3), fsad148.

ZSL and IUCN National Red List Working Group. 2022. National Red List Database. Version 2022-x. <https://www.nationalredlist.org>. Accessed on 17 July 2025.

## SINERGIA SUSTENTÁVEL ENTRE ENERGIA EÓLICA E DATA CENTERS: PRINCIPAIS DESAFIOS E OPORTUNIDADES

**Autores** Luana Pereira Nogueira<sup>1</sup>, David Cassimiro de Melo<sup>2</sup>, Andressa Medeiros Santiso<sup>3</sup>, Lucas Thiago Gomes Soares de Araújo<sup>4</sup>, Matheus Eurico Soares de Noronha<sup>5</sup>, Mario Orestes Aguirre González<sup>6</sup>

1, 2, 3, 4 e 6 Creation Research Group – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)  
5 Escola Superior de Propaganda e Marketing (ESPM)

[luanapereiranog@gmail.com](mailto:luanapereiranog@gmail.com)<sup>1</sup>, [davidcassi@yahoo.com.br](mailto:davidcassi@yahoo.com.br)<sup>2</sup>, [andressamsantiso@gmail.com](mailto:andressamsantiso@gmail.com)<sup>3</sup>,  
[lucasago28@gmail.com](mailto:lucasago28@gmail.com)<sup>4</sup>, [math.euriconoronha@icloud.com](mailto:math.euriconoronha@icloud.com)<sup>5</sup>, [mario.gonzalez@ufrn.br](mailto:mario.gonzalez@ufrn.br)<sup>6</sup>

### RESUMO

O avanço das tecnologias digitais e inteligência artificial tem impulsionado a demanda por data centers, que são grandes consumidores de energia elétrica. Diante dos compromissos globais de descarbonização dos diferentes setores econômicos, os data centers têm iniciado e apresentado um aumento no interesse no consumo de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Nesse contexto, o objetivo deste artigo é analisar os desafios, oportunidades e as sinergias de integração entre projetos de energia eólica e data centers. Para isso, foi desenvolvida uma pesquisa qualitativa, com a análise de dois estudos de caso. Os resultados revelam que a integração de data centers com energia eólica pode ser uma solução viável para a descarbonização do setor, promovendo benefícios ambientais, reputacionais e econômicos para esses empreendimentos. Além disso, foram identificadas barreiras como a variabilidade da geração e dependência de infraestrutura elétrica adequada para atender esses projetos.

**Palavras-chaves:** data center; energia eólica; energia verde; descarbonização.

### ABSTRACT

The advancement of digital technologies and artificial intelligence has driven the demand for data centers, which are major consumers of electricity. Considering global commitments to decarbonize various economic sectors, data centers have shown increasing interest in sourcing electricity from renewable energy sources. In this context, the objective of this article is to analyze the challenges, opportunities, and synergies involved in integrating wind energy projects with data centers. To this end, a qualitative research approach was adopted, including the analysis of two case studies. The results reveal that integrating data centers with wind energy can be a viable solution for decarbonizing the sector, offering environmental, reputational, and economic benefits for these enterprises. Furthermore, barriers such as the intermittency of wind generation and dependence on adequate electrical infrastructure to support these projects were also identified.

**Keywords:** data center; wind energy; green energy; decarbonization.

### 1. INTRODUÇÃO

O setor de tecnologia tem sido considerado um importante consumidor de energia elétrica devido ao desenvolvimento acelerado das inteligências artificiais, o que gerou um aumento na demanda por *data centers* para fornecer suporte a toda a infraestrutura de dados que é necessária para o seu funcionamento. Conforme pesquisa desenvolvida pela Boston Consulting Group (2025), entre 2024 e 2030 a demanda por *data centers* exigirá um investimento de 1,8 trilhão de dólares.

Acompanhado desse investimento, será observado, em conjunto, um aumento no consumo de energia elétrica. Estima-se que, até o final da década, o consumo de eletricidade dos *data centers* poderá dobrar, atingindo patamares de 945 TWh (IEA, 2025).

No cenário nacional, é possível observar um aumento no interesse em desenvolver esse tipo de empreendimento. O Ministério de Minas e Energia (MME) estima que até 2035 a demanda máxima de energia para esses empreendimentos pode chegar a 9 GW (MME, 2024). Esse quantitativo tem como base 22 projetos registrados nos estados de São Paulo, Rio Grande do Sul, Ceará, Rio Grande do Norte e Bahia.

O interesse por investimentos no Brasil pode ser impulsionado pelo desenvolvimento de políticas públicas que tem o potencial de estimular o setor. A Política Nacional de *Data Centers*, conhecida como *Redata*, deve ser lançada ainda em 2025, e prevê isenções de impostos como IPI, PIS/COFINS e impostos de importação sobre equipamentos por cinco anos. Com esses incentivos, espera-se que o país possa atrair investimentos da ordem de R\$ 2 trilhões pela próxima década (CNN Brasil, 2025a;2025b).

Arelado ao desenvolvimento de um ambiente regulatório que poderá incentivar novos investimentos no setor, o Brasil ainda apresenta um fator competitivo adicional: a sua matriz elétrica predominantemente renovável. Segundo dados do MME (2024), as fontes renováveis representam mais de 80% da matriz elétrica brasileira. Para uma indústria que contribui com 1% das emissões globais de gases de efeito estufa, a partir do consumo de energia (IEA, 2023), localizar-se em regiões onde a oferta de fontes renováveis é abundante pode contribuir com a descarbonização do setor.

Neste cenário, a energia eólica tem se apresentado como uma alternativa para contribuir com a descarbonização desse setor, o que motivou o desenvolvimento desta pesquisa, a qual tem a seguinte questão a ser respondida: *“Como a integração de data centers com projetos de energia eólica pode contribuir para a descarbonização do setor?”*. Para responder esse questionamento, o presente artigo propõe-se a analisar os desafios, oportunidades e as sinergias de integração entre projetos de energia eólica e data centers.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Data Centers: componentes e função global

Os data centers são vitais para a economia digital e para o funcionamento de serviços públicos e privados, pois são a espinha dorsal da infraestrutura digital e permitem o funcionamento de serviços em nuvem, plataformas de streaming, redes sociais, sistemas de governo, sistemas corporativos e bancários, entre outros usos (IEA, 2025).

Para desempenhar essas funções essenciais, os data centers são formados por importantes componentes, que têm a função global de processar, armazenar e transmitir informações digitais (Oró, Salom, 2022; Brasil, 2025), como:

- i) Servidores – são computadores que processam e armazenam dados e podem ser equipados com unidades centrais de processamento e aceleradores especializados, como as unidades de processamento gráfico;
- ii) Sistemas de armazenamento – onde os dados são armazenados (ex: HDs, SSDs, arrays de armazenamento);
- iii) Equipamentos de rede – como roteadores e switches, que permitem a conexão entre dispositivos dentro do data center e o direcionamento do tráfego e balanceadores de carga para otimizar o desempenho do sistema;
- iv) Infraestrutura elétrica e de refrigeração – são sistemas robustos que regulam a temperatura e umidade para manter os equipamentos operando em condições adequadas, pois os equipamentos geram muito calor, essa infraestrutura de refrigeração consumo muita energia, sua participação no consumo total do data center pode variar de 7% a mais de 30% a depender da eficiência energética do sistema;
- v) Sistemas de segurança e outras infraestruturas de apoio – como o monitoramento físico (câmeras de vigilância, controles de acesso) e cibernético (*firewalls*, criptografia), iluminação (IEA, 2025).

### 2.2 Data Center Verde: uso e formas de contratação da energia renovável

Em razão do alto consumo de energia, dos movimentos pela descarbonização do setor e pela

pressão que em muitas localidades a rede elétrica é limitada, toda essa conjuntura faz com que, globalmente, os provedores de data centers recorram à energia renovável como uma solução mais econômica e sustentável (Green, 2025). Em relação a energia que alimenta os data centers, os investimentos em parcerias de energia renovável e os Contratos de Compra de Energia de longo prazo (PPAs) tornaram-se uma tendência entre operadores desses empreendimentos (Arizton, 2025).

Big Techs (Alphabet - Google, Amazon, Apple, Meta e Microsoft), responsáveis por aproximadamente 7 a 10% do consumo de energia total de data centers do mundo, assumiram compromissos importantes em relação à neutralidade de carbono. A Google comprometeu-se em zerar suas emissões líquidas de carbono até 2030 (Google, 2024c) e a Amazon já alcançou a neutralidade de carbono em 2023 (Amazon, 2025). Nessa perspectiva, observa-se uma tendência de investimento em abordagens inovadoras para o fornecimento de energia sustentável, visando a redução da pegada de carbono desse setor (Arizton, 2025).

Nesse contexto, o Brasil se destaca em razão da matriz elétrica renovável que contribui para atração dos investidores em data centers interessados em adquirir uma energia limpa de baixo custo. Esses investidores podem contratar energia renovável no país pelo Mercado Livre de Energia, por meio de PPAs com produtores de energia eólica e também solar, e pelo modelo de autoprodução que também é uma prática comum adotada e prevista no arcabouço jurídico brasileiro.

### 2.3 Data Centers: status Brasil e o consumo nacional de eletricidade

Atualmente, o maior mercado de data center da América Latina é o Brasil, que detém cerca de 50% dos data centers em operação (Data Center Dynamics, 2022). Em 2023, os investimentos realizados pelos setores de data centers e computação em nuvem na América Latina totalizaram US\$19,73 bilhões (Rabelo et al., 2025). Esse investimento tenderá a se expandir, em especial, no Brasil, com o Redata, que prevê isenções tributárias (CNN Brasil, 2025a; 2025b).

O Brasil tem atraído novos investimentos em data centers devido à ampla oferta de energia renovável e ao baixo custo de imóveis e terrenos, principalmente quando comparado a outros países (Rabelo et al., 2025). Essas razões estão destacadas no estudo do governo federal “Estratégia para implementação de uma política pública de atração de Data Centers” (Brasil, 2023). Outros fatores que vem impulsionando este mercado nacional de data centers são a adoção da computação em nuvem, implantação comercial de rede 5G, Inteligência Artificial, Internet das Coisas e Big Data (Data Center Dynamics, 2022).

Em consonância, o Plano Brasileiro de Inteligência Artificial prevê R\$ 500 milhões de investimento no setor, como parte do Plano, o Pró-Infra IA Sustentável do Governo Federal vai financiar projetos como foco na implementação de data centers verdes (Brasil, 2025). Além disso, o governo brasileiro aprovou a medida provisória N°1.307/2025 que estabelece obrigatoriedade de utilização de energia elétrica renovável para que empresas de data centers possam usufruir dos benefícios tributários das Zonas de Processamento de Exportação (ZPE).

A capacidade dos data centers no mercado brasileiro foi de 740 MW em 2024 e estima-se que deverá atingir 1.210 MW até 2029, crescendo a uma taxa anual de 10,17% durante o período de 2024 a 2029 (Mordor Intelligence, 2024). O mercado nacional de data centers conta com 187 unidades, dentre as quais 64 (34%) estão localizadas no estado de São Paulo. Essa concentração ocorre pela proximidade com as empresas e do principal polo consumidor do país. Os data centers estão em expansão no Rio de Janeiro e tem uma parcela significativa nos estados do Ceará e do Rio Grande do Sul (Tiinside, 2024).

## 3. MÉTODO DO ESTUDO

O desenvolvimento de uma pesquisa científica constitui um procedimento formal que visa identificar a realidade e aferir novos fatos, relações ou leis (González, 2010). Esta pesquisa adota uma abordagem qualitativa, com a utilização de estudos de caso como estratégia metodológica, permitindo uma compreensão aprofundada do objeto de estudo (Creswell, 2009; Yin, 2001) ao identificar sinergias da integração entre projetos de energia eólica e data centers. O procedimento metodológico foi estruturado em quatro etapas principais, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Procedimento da pesquisa



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

- **1ª Etapa – Definição do tema e escopo da pesquisa:** Nesta fase inicial, realizou-se a identificação e análise dos principais temas em discussão no setor eólico. O setor de data centers tem observado um crescimento exponencial como consequência do avanço da transformação digital e uso crescente de novas tecnologias. Diante da pressão global para redução de emissões de gases de efeito estufa, o setor digital passou a ser pressionado a assumir compromissos e buscar por soluções sustentáveis de suprimento. A energia eólica aponta como alternativa para atender a demanda crescente de energia neste setor.
- **2ª Etapa – Revisão da literatura:** Foram analisadas publicações e relatórios nacionais e internacionais sobre o status atual dos data centers, seu consumo energético e a importância do uso da energia renovável.
- **3ª Etapa – Condução dos estudos de caso:** Esta etapa envolveu a seleção e análise de dois estudos de caso. O primeiro estudo de caso analisou o data center da Google localizado em Eemshaven, nos Países Baixos, selecionado com base em sua relevância internacional, disponibilidade de dados e representatividade como modelo de integração entre data centers e energia eólica. O segundo estudo de caso contemplou o caso da ODATA, uma das principais provedoras de serviços de data center na América Latina atuantes no Brasil, pioneira no Brasil ao investir em um modelo de autoprodução de energia renovável. Esse caso foi selecionado com o objetivo de analisar os avanços promovidos pela empresa pioneira na região, seus principais desafios e oportunidades.
- **4ª Etapa – Análise e identificação de sinergias:** Por fim, a revisão da literatura e a análise dos casos permitiram identificar desafios e oportunidades em contextos nacionais e internacionais, oferecendo subsídios para a proposição de potenciais sinergias entre os setores.

## 4. ESTUDOS DE CASO

### 4.1 ODATA Data Center Brasil

A ODATA é uma das principais provedoras de serviços de data center na América Latina. Com presença crescente no Brasil, a empresa tem como um de seus pilares estratégicos a sustentabilidade energética, buscando suprir a demanda intensiva de seus data centers com fontes limpas e renováveis (Odata, 2025).

Como parte desse compromisso, a ODATA tornou-se pioneira na região ao investir em um modelo de autoprodução de energia renovável. Em 2022, firmou um acordo com a Serena Energia para participação no parque eólico Assuruá IV, localizado em Xique-Xique, na Bahia, com capacidade instalada de 212 MW. Essa parceria permitiu o aumento de 135% no volume contratado de energia, alinhando-se com a meta de suprir integralmente suas operações com energia renovável (Odata, 2025).

A estratégia de autoprodução avançou ainda mais com a parceria com a Casa dos Ventos, uma das líderes em geração renovável no Brasil. A ODATA adquiriu participação no parque eólico Rio do Vento, também na Bahia, que possui 360 MW de capacidade instalada e 80 aerogeradores. Essa parceria assegura o consumo de energia 100% renovável nas operações da empresa no país, reduzindo drasticamente a pegada de carbono associada aos data centers, tradicionalmente considerados intensivos em energia (Cenário Energia, 2024).

A empresa considera a implementação de centros de dados sustentáveis desafiadora devido, entre outros motivos, aos investimentos iniciais elevados e à complexidade das regulamentações. A construção

de data centers verdes possui gastos mais significativos, porém com melhor Retorno sobre o Investimento (ROI) no longo prazo (Odata, 2025).

Além disso, políticas governamentais vêm se tornando mais favoráveis à sustentabilidade, oferecendo incentivos e programas de apoio. A ODATA, se beneficia de descontos nas tarifas de transmissão de energia e isenção de encargos setoriais, o que reduz o custo final da energia obtida para autoconsumo (Odata, 2025).

A ODATA também considera como benefício a melhoria na reputação corporativa e alinhamento com padrões ESG exigidos por clientes e investidores globais e tem replicado o modelo em outros países da América Latina com alto potencial eólico e solar, como Chile e Colômbia (Odata, 2025).

#### 4.2 Google Data Center Eemshaven (Países Baixos)

O data center da Google em Eemshaven, teve sua construção iniciada em setembro de 2014 com um investimento inicial de aproximadamente € 900 milhões e geração de diversos empregos na região (Dutch Data Center Association, 2024). Concluído em 2016, é considerado o primeiro data center da empresa movido integralmente a energia verde (Groningen Seaports, 2015).

Antes mesmo da inauguração, a Google firmou um contrato de compra de energia (PPA) por 10 anos com a empresa Eneco, assegurando o fornecimento de 62 MW de energia oriunda do parque eólico de Delfzijl, o que garantiu a operação 100% renovável desde sua abertura (Eneco, 2014).

Com a crescente demanda por seus serviços, especialmente YouTube e Google Search, as plantas de Eemshaven passaram por sucessivas expansões. Em 2018, a empresa investiu mais € 500 milhões em ampliação, repetindo o mesmo valor em uma nova fase de expansão em 2019 (Groningen Seaports, 2019).

A Google pretende operar com energia livre de carbono 24/7 até 2030, objetivo que exige uma combinação de fontes renováveis e otimização da gestão energética em tempo real (Google, 2024a). Assim, em 2023, novos contratos de compra de energia foram firmados com os parques eólicos de Fryslân e Kroningswind, totalizando 153 MW e 0,5 TWh por ano. Com isso, espera-se que o data center de Eemshaven opere com 80% de energia sustentável já em 2024 (Eneco, 2023).

A integração entre fontes renováveis e data centers apresenta benefícios ambientais e de segurança energética, mas também desafios técnicos. A variabilidade da energia eólica gera descompasso entre oferta e demanda, o que pode comprometer o fornecimento contínuo para o data center. Para mitigar esse risco, em 2025 foi instalado um sistema de armazenamento por bateria de 41 MWh, desenvolvido pela RWE, como parte do projeto OranjeWind, um parque eólico offshore de 795 MW (RWE, 2025). Ainda que a Google conte com contratos PPA, o data center permanece conectado à rede elétrica nacional da Holanda, assegurando redundância energética nos momentos em que as fontes renováveis não atendem à carga demandada (Google, 2024b).

Outro desafio decorre da disponibilidade e estabilidade da infraestrutura elétrica. O data center depende da inserção das energias contratadas na malha nacional, sobre a qual não tem controle direto. Situações como congestionamento da rede, falhas na transmissão ou indisponibilidade temporária podem levar ao uso de fontes fósseis. Para mitigar esse risco, a Google diversificou sua carteira de PPAs, envolvendo energia solar, eólica onshore e offshore, além de cooperar com a operadora nacional TenneT para reforçar a infraestrutura e garantir o despacho prioritário da energia renovável (DLA PIPER, 2022).

A instalação da Google em Eemshaven também enfrentou críticas públicas sobre a priorização de grandes corporações em detrimento do acesso à energia por consumidores residenciais e pequenas empresas, bem como o uso intensivo de solo e água por data centers. Esses fatores motivaram o governo holandês, em 2022, a estabelecer critérios técnicos e sociais rigorosos para autorizar a instalação de data centers hiperescaláveis, exigindo maior transparência, uso racional de recursos e benefícios locais tangíveis (DLA PIPER, 2022).

## 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

À medida que a demanda por infraestrutura digital cresce, o modelo de integração com fontes renováveis torna-se essencial para garantir crescimento sustentável desse setor, com menor impacto ambiental e maior responsabilidade socioambiental. No entanto, essa integração apresenta alguns

desafios. Aspectos como a intermitência da geração, a necessidade de infraestrutura de conexão dedicada, a regulação do mercado livre de energia e a rastreabilidade da energia renovável impõem barreiras que precisam ser enfrentadas com inovação e planejamento conjunto.

Por outro lado, a colaboração entre os dois setores pode destravar oportunidades para todas as partes. De modo a identificar as potenciais sinergias entre a utilização de energia eólica nas atividades de data centers, alguns desafios e oportunidades foram identificados com base na literatura e nos estudos de casos analisados. A Tabela 1 apresenta os principais desafios e oportunidades mapeados.

Tabela 1 – Desafios e oportunidades na integração da energia eólica com data centers

<p><b>Desafios</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intermittência da fonte eólica, gerando complexidade para alinhar produção e consumo intenso e contínuo;</li> <li>• Dependência da rede elétrica nacional como backup, mesmo em casos de autoprodução;</li> <li>• Aceitação social atrelado ao uso intensivo de recursos naturais;</li> <li>• Altos custos de investimento em infraestrutura e armazenamento de energia;</li> <li>• Altos custos relacionados a contratos de PPA ou compra de parques eólicos;</li> <li>• Barreiras legais e burocráticas para autoprodução e acesso ao mercado livre;</li> <li>• Data centers exigem comprovação de uso de energia 100% renovável (rastreamento por I-RECs ou similares), exigindo controles extras.</li> </ul>
<p><b>Oportunidades</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de fonte renovável. Eólica offshore surge como alternativa pela escalabilidade e renovabilidade;</li> <li>• Fortalecimento da imagem corporativa;</li> <li>• Capacidade de replicação de integração entre TI e renováveis em regiões com potencial eólico ou solar;</li> <li>• A instalação de data centers próximos a hubs de energia renovável (como portos de suporte à eólicas offshore) reduz perdas na transmissão e aumenta a eficiência do sistema;</li> <li>• Acesso a incentivos fiscais;</li> <li>• Data centers operam com alta carga contínua, o que facilita o planejamento e financiamento de parques eólicos com contratos de longo prazo (PPAs);</li> <li>• Maior visibilidade para atração de <i>funding</i> sustentável;</li> <li>• Diversificação da base de consumidores de energia eólica;</li> <li>• Promoção da industrialização e criação de empregos verdes;</li> <li>• Venda de excedentes e energia gerada por parques de autoprodução para outros consumidores</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

De modo a alinhar os objetivos operacionais dos data centers à adoção de energia eólica, potenciais sinergias foram identificadas entre os setores, conforme sintetizadas na Figura 2 e descritas a seguir.

Figura 2 – Sinergias data centers e setor eólico



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

### 1) Utilização de energia renovável e redução de emissões

A integração entre data centers e projetos eólicos permite a utilização direta de energia renovável, contribuindo para a descarbonização das operações de tecnologia da informação. Essa sinergia possibilita a redução das emissões de gases de efeito estufa associadas ao consumo de energia elétrica, viabilizando

o cumprimento de metas climáticas corporativas e regulatórias, ao mesmo tempo em que promove a substituição de fontes fósseis por energias verdes.

## 2) Alinhamento ESG e marketing verde

Ao promover projetos sustentáveis, ambos os setores ganham reputação em aspectos ESG e marketing verde frente ao mercado mundial, atendendo a metas climáticas e exigências regulatórias e de mercado. Aumentando a transparência e a responsabilidade ambiental das operações, a integração entre setores contribui para a valorização da marca perante investidores, clientes e órgãos reguladores, sendo utilizada como ferramenta de marketing verde e vantagem competitiva em um mercado cada vez mais orientado por critérios de sustentabilidade.

## 3) Demanda e oferta de energia elétrica

A demanda contínua e previsível dos data centers representa uma oportunidade estratégica para os desenvolvedores eólicos, uma vez que esses empreendimentos são responsáveis por uma grande quantidade de produção de energia elétrica. Isso fica ainda mais evidente em projetos eólicos *offshore*, onde a capacidade instalada dos projetos pode ultrapassar 1 GW. Essa característica favorece a celebração de contratos de longo prazo (PPAs), que garantem estabilidade financeira aos projetos eólicos e previsibilidade de custos aos operadores de data centers, contribuindo para o equilíbrio entre oferta e demanda no setor elétrico.

## 4) Co-localização

A instalação de data centers em áreas próximas a *hubs* eólicos (*onshore* ou *offshore*, via portos) reduz perdas energéticas e custos com infraestrutura elétrica, visto que reduz a necessidade de investimento na rede. Ademais, permite também que os data centers estabilizem seus custos de eletricidade por meio de contratos de compra de energia, além de resultar em economias nas tarifas relacionadas ao uso da rede.

## 5) Modelos de autoprodução ou comercialização via mercado livre

A possibilidade de estruturação de modelos de autoprodução ou de contratação direta de energia via mercado livre representam alternativas para fornecimento de energia renovável data centers e desenvolvedores eólicos. A aquisição de certificados de energia renovável, como os International Renewable Energy Certificates (I-RECs), possibilita a comprovação da origem limpa da energia consumida, mesmo quando o fornecimento físico não ocorre de forma direta.

## 6) Promoção da industrialização e a geração de empregos qualificados

A sinergia entre os setores eólico e de tecnologia da informação contribui para o fortalecimento da cadeia produtiva nacional, promovendo a industrialização e impulsionando a criação de empregos qualificados nas áreas de engenharia, tecnologia, operação e manutenção, estimulando o desenvolvimento socioeconômico local.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os data centers são infraestruturas essenciais para a economia digital e destacam-se pelo alto consumo de energia elétrica demandado para manter toda a sua operação. O crescimento acelerado de tecnologias digitais, como a inteligência artificial, *big data* e computação em nuvem refletem diretamente na criação de novas infraestruturas de data centers e, conseqüentemente, em um maior consumo de energia elétrica. Nesse cenário a busca de fontes renováveis de eletricidade surge como uma alternativa estratégica de modo a permitir um desenvolvimento sustentável do setor de tecnologia.

O presente artigo teve como objetivo analisar os principais desafios, oportunidades e sinergias de integração entre data centers e energia eólica, por meio de uma pesquisa qualitativa com uso de estudos de caso. Os resultados obtidos permitem concluir que a associação entre data centers e energia eólica pode ser uma estratégia eficaz para reduzir a pegada de carbono do setor de tecnologia, principalmente devido à alta capacidade de produção de energia produzida pelos projetos eólicos.

A apresentação dos dois estudos de caso (ODATA e Google) permitiu observar que a inserção da

energia eólica no setor de tecnologia é uma prática já em adoção internacional e nacionalmente. A união entre esses setores pode gerar alguns benefícios relacionados a valorização da imagem institucional das empresas de tecnologia, atendimentos aos critérios ESG, atração de investimentos para localidades com grande potencial de energia eólica e o estímulo ao desenvolvimento regional nessas áreas a partir da geração de uma nova indústria e novos empregos.

Por outro lado, também foram observados desafios relevantes como a variabilidade da geração eólica, os altos custos iniciais com infraestrutura, a necessidade de melhorias na rede elétrica para a conexão dos data centers e os requisitos de rastreabilidade da energia utilizada. Diante desses desafios, diversificar as fontes de energia elétrica foi uma das soluções encontradas pela Google em seu data center localizado nos países baixos. Além disso, os estudos de caso permitiram concluir que os desafios estão também presentes no aspecto socioambiental. Nesse sentido, o diálogo com governos e comunidades locais mostrou-se como uma ação fundamental para aumentar as chances de aceitação social, permitindo a instalação desses grandes empreendimentos tecnológicos.

### 6.1 Sugestão de Pesquisas Futuras e Limitações

Como caminhos para futuras pesquisas, a avaliação da viabilidade de co-localização entre usinas eólicas e data centers, e a investigação de impactos socioambientais decorrentes da implantação conjunta dessas infraestruturas, com destaque para o uso da água, insumo necessário para o resfriamento dos equipamentos utilizados nos data centers. Esses estudos podem apoiar o avanço de políticas públicas mais eficazes, bem como orientar decisões estratégicas de empresas que tem como objetivo tornar suas operações mais limpas.

A limitação da pesquisa reside na abordagem metodológica de estudo de caso. Os casos selecionados apresentam delimitações específicas de fatores locais e que podem limitar a generalização da amostra de dados qualitativa. Sugere-se que pesquisadores explorem casos alternados, apropriando-se de dados quantitativos para avaliar as demandas energéticas dos data centers e o suprimento por meio da fonte de energia eólica (onshore e offshore).

## REFERÊNCIAS

ARIZTON. **Brazil Data Center Market - Investment Analysis & Growth Opportunities 2025-2030**. 2025. Disponível em: <https://www.arizton.com/market-reports/brazil-data-center-market-investment-analysis-report-2025>. Acesso em: 07 jul. 2025.

BCG. **Breaking barriers to data center growth**. 2025. Disponível em: <https://www.bcg.com/publications/2025/breaking-barriers-data-center-growth>. Acesso em: 31 jul. 2025.

BRASIL, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Estratégia para Implementação de Política Pública para Atração de Data Centers**. 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/comercio-e-servicos/comercio/estudo\\_completo\\_datacenters\\_jun2023.pdf/view](https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/comercio-e-servicos/comercio/estudo_completo_datacenters_jun2023.pdf/view). Acesso em: 14 jul. 2025.

BRASIL, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **PBIA prevê R\$ 500 milhões para data centers verdes, que aliam tecnologia e sustentabilidade**. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2025/02/pbia-preve-r-500-milhoes-para-data-centers-verdes-que-aliam-tecnologia-e-sustentabilidade>. Acesso em: 22 jul. 2025.

CENÁRIO ENERGIA. **Odata e Casa dos Ventos firmam parceria estratégica para expandir data centers com energia 100% renovável**. 2024. Disponível em: <https://cenarioenergia.com.br/2024/10/21/odata-e-casa-dos-ventos-firmam-parceria-estrategica-para-expandir-data-centers-com-energia-100-renovavel/>. Acesso em: 31 jul. 2025.

CNN BRASIL. **Haddad apresenta proposta para atração de data centers nos EUA**. 2025b. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/haddad-apresenta-proposta-para-atracao-de-data-centers-nos-eua/>. Acesso em: 07 jul. 2025.

CNN BRASIL. **Política de data centers deve ser lançada nos próximos dias, diz Alckmin.** 2025a. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/politica-de-data-centers-deve-ser-lancada-nos-proximos-dias-diz-alkmin/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

CRESWELL, J. W. **Mapping the Field of mixed Methods Research.** *Journal of mixed Methods Research*, v. 3, n. 2, p. 95–108, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1177/1558689808330883>.

DATA CENTER DYNAMICS. Tamanho do mercado de data centers no Brasil é avaliado em US\$ 2,23 bilhões e deve chegar a US\$ 3,69 bilhões até 2027, aponta estudo da Arizton. Disponível em: <https://www.datacenterdynamics.com/br/not%C3%ADcias/tamanho-do-mercado-de-data-centers-no-brasil-%C3%A9-avaliado-em-us-223-bilh%C3%B5es-e-deve-chegar-a-us-369-bilh%C3%B5es-at%C3%A9-2027-aponta-estudo-da-arizton/>

DLA PIPER. **Data centers in the Netherlands: A shifting landscape?** 2022. Disponível em: <https://www.dlapiper.com/en/insights/publications/real-estate-gazette/real-estate-gazette-data-centers/data-centers-in-the-netherlands-a-shifting-landscape>. Acesso em: 14 jul. 2025.

DUTCH DATA CENTER ASSOCIATION. **Google – Participant profile.** 2024. Disponível em: <https://www.dutchdatacenters.nl/en/participants/google/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

ENECO. **Dutch windmills to power Google’s Eemshaven data center.** 2014. Disponível em: <https://news.eneco.com/dutch-windmills-to-power-googles-eemshaven-data-center>. Acesso em: 14 jul. 2025.

ENECO. **Google and Eneco working together to make Eemshaven data centre power more sustainable.** 2023. Disponível em: <https://news.eneco.com/google-and-eneco-working-together-to-make-eemshaven-data-centre-power-more-sustainable>. Acesso em: 14 jul. 2025.

GONZÁLEZ, M. O. A. Processo para Gerenciar a Integração de Clientes no Processo de Desenvolvimento do Produto. 2010. 242 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

GOOGLE. **2024 Environmental Report.** 2024c. Disponível em: <https://sustainability.google/reports/google-2024-environmental-report/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

GOOGLE. **Carbon-free energy – Our journey to 24/7 CFE.** 2024b. Disponível em: <https://www.google.com/about/datacenters/cleanenergy/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

GOOGLE. **Our data centers in the Netherlands.** 2024a. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/about/datacenters/locations/eemshaven>. Acesso em: 14 jul. 2025.

GREEN, M. **RWE agrees 10-year PPA with data centre provider.** 2025. Disponível em: <https://www.current-news.co.uk/rwe-agrees-10-year-ppa-with-data-centre-provider/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

GRONINGEN SEAPORTS. **Brochure: Dataport Eemshaven.** 2015. Disponível em: <https://www.groningen-seaports.com/wp-content/uploads/Brochure-Dataport-Eemshaven-dec-2015-1.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2025.

GRONINGEN SEAPORTS. **Google expands again in Eemshaven.** 2019. Disponível em: <https://www.groningen-seaports.com/en/nieuws/google-expands-again-in-eemshaven/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

IEA, International Energy Agency. **Energy and AI.** 2025. Disponível em:

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/601eaec9-ba91-4623-819b-4ded331ec9e8/EnergyandAI.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2025.

IEA. **Data centres and data transmission networks**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **MME identifica crescimento acelerado na demanda de energia elétrica para projetos de data centers**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-identifica-crescimento-acelerado-na-demanda-de-energia-eletrica-para-projetos-de-data-centers>. Acesso em: 2 ago. 2025.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho e análise de participação do mercado de data center no Brasil** - tendências e previsões de crescimento até 2029. 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/brazil-data-center-market>. Acesso em: 02 jul. 2025.

ODATA. **Autoprodução de energia: entenda como funciona e quais as vantagens para empresas**. 2025. Disponível em: <https://odatacolocation.com/blog/autoproducao-de-energia/>. Acesso em: 31 jul. 2025.

ORÓ, E.; SALOM, J. Data Centre Overview. In book: **Advanced Concepts for Renewable Energy Supply of Data Centres** (pp.1-26), 2022. DOI: 10.1201/9781003336990-1

RABELO *et al.* **Brazil's leading position in data centre and cloud computing investments: key drivers and future perspectives**. 2025. Disponível em: [https://www.ibanet.org/Brazil-leading-data-centre-cloud-computing-investments#\\_ftn9](https://www.ibanet.org/Brazil-leading-data-centre-cloud-computing-investments#_ftn9). Acesso em: 02 jul. 2025.

RWE. **RWE switches on large-scale battery energy storage system in Eemshaven**. 2025. Disponível em: <https://www.rwe.com/en/press/rwe-generation/2025-03-13-rwe-switches-on-large-scale-battery-energy-storage-system-in-eemshaven/>. Acesso em: 14 jul. 2025.

TIINSIDE. **Mercado de data center cresce no Brasil, com Campinas liderando e Rio de Janeiro em expansão**. 2024. Disponível em: <https://tiinside.com.br/07/03/2024/mercado-de-data-center-cresce-no-brasil-com-campinas-liderando-e-rio-de-janeiro-em-expansao/>. Acesso em: 02 jul. 2025.

YIN, R. K. **Estudo de Caso** - Planejamento e métodos. 2. ed., 2001.

## DIAGNÓSTICO ESTRATÉGICO PARA A PRODUÇÃO DE AÇO VERDE: OPORTUNIDADES PARA O BRASIL

**Autores** Willon José Trindade Filho<sup>1</sup>, Nathalia Alves de Oliveira<sup>2</sup>, Mario Orestes Aguirre González<sup>3</sup>, Maria Eduarda Medeiros Monteiro<sup>4</sup>, Luana Pereira Nogueira<sup>5</sup>, Andressa Medeiros Santiso<sup>6</sup>, Artur Oliveira Santos<sup>7</sup>

1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 CREATION Research Group – Grupo de Pesquisa em Inovação de Produtos e Processos para Energias Renováveis/UFRN

[willon.jose.017@ufrn.edu.br](mailto:willon.jose.017@ufrn.edu.br), [nathalia.alves.117@ufrn.edu.br](mailto:nathalia.alves.117@ufrn.edu.br), [mario.gonzalez@ufrn.br](mailto:mario.gonzalez@ufrn.br),  
[eduarda.monteiro.109@ufrn.edu.br](mailto:eduarda.monteiro.109@ufrn.edu.br), [luanapereiranog@gmail.com](mailto:luanapereiranog@gmail.com), [andressamsantiso@gmail.com](mailto:andressamsantiso@gmail.com),  
[arturolover.eng@gmail.com](mailto:arturolover.eng@gmail.com)

### RESUMO

A siderurgia é um dos setores mais intensivos em emissão de gases de efeito estufa, o que torna urgente a busca por alternativas sustentáveis para a sua descarbonização. Nesse sentido, a produção de aço verde surge como uma solução viável, principalmente por utilizar o hidrogênio verde como insumo e a eólica offshore como fornecedora de grande quantidade de eletricidade renovável. O estudo teve como objetivo identificar estratégias para viabilizar e impulsionar essa produção no Brasil, utilizando uma revisão da literatura e correlacionando os dados obtidos através da construção de uma matriz SWOT como ferramenta de análise estratégica. Os resultados demonstram que o país possui vantagens competitivas significativas, como abundância de minério de ferro, preço e volume competitivo de energia renovável e o interesse na transição para uma economia de baixo carbono. Contudo, desafios como a necessidade de infraestrutura adequada, altos investimentos e a concorrência internacional ainda representam barreiras à consolidação do setor de aço verde. Conclui-se que, apesar das incertezas, a viabilidade da produção de aço verde no Brasil pode ser fortalecida por políticas públicas, inovação tecnológica e incentivos atrelados a agregação de valor para o país. Recomenda-se que estudos futuros possam aprofundar a análise de patentes de rotas tecnológicas, investigar o nível de adequação do aço verde aos critérios de zero emissão CO<sub>2</sub> e avaliar os impactos socioeconômicos da transição para a siderurgia sustentável.

**Palavras-chaves:** Indústria siderúrgica; Sustentabilidade; Hidrogênio verde; Energia eólica offshore; Aço verde.

### ABSTRACT

The steel industry is one of the most greenhouse gas-intensive sectors, making the search for sustainable alternatives for its decarbonization urgent. In this context, green steel production emerges as a viable solution, mainly due to its use of green hydrogen as a key input and offshore wind power as a major source of renewable electricity. This study aimed to identify strategies to enable and boost this production in Brazil by conducting a literature review and correlating the data through the development of a SWOT matrix as a strategic analysis tool. The results show that Brazil holds significant competitive advantages, such as abundant iron ore resources, competitive prices and volumes of renewable energy, and strong interest in transitioning to a low-carbon economy. However, challenges such as the need for adequate infrastructure, high investment costs, and international competition still pose barriers to the consolidation of the green steel sector. It is concluded that, despite existing uncertainties, the feasibility of green steel production in Brazil can be strengthened through public policies, technological innovation, and incentives linked to value creation for the country. Future studies are recommended to deepen the analysis of technological route patents, assess the alignment of green steel with zero CO<sub>2</sub> emission standards, and evaluate the socioeconomic impacts of the transition to sustainable steelmaking.

**Keywords:** Steel industry; Sustainability; Green hydrogen; Offshore wind energy; Green steel.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da infraestrutura, inovações tecnológicas e expansão industrial, a demanda por aço tem aumentado, impulsionada pelo desenvolvimento econômico e pelas mudanças globais, reforçando a importância da siderurgia como setor estratégico. De acordo com a Shen *et al.* (2025), a produção de materiais intensivos em energia e com altas emissões, como o aço, representa um desafio para a descarbonização da indústria, tornando a transição para cadeias siderúrgicas sustentáveis um fator decisivo para a ação climática global e seu impacto transformador.

A alternativa mais viável é o uso de energias renováveis, que tiveram nos últimos anos um aumento significativo na capacidade instalada dos países, dentre eles a energia eólica e solar. A energia eólica *offshore* possui grande potencial para albergar projetos na escala de gigawatts e possuem melhores eficiências para gerar eletricidade quando comparada a outras fontes renováveis, isso devido à potência nominal da turbina e a qualidade do vento de determinadas regiões do planeta (González *et al.*, 2025).

Em termos quantitativos, o Brasil figurou em nono lugar entre os países que mais produziram aço em 2023, com cerca de 31,8 milhões de toneladas de aço bruto, representando uma redução em relação a 2022, quando o país produziu 34,1 milhões de toneladas (World Steel Association, 2024). Contudo, o país ainda continua a usar grandes volumes de carvão mineral, uma fonte fóssil e emissora de CO<sub>2</sub> na produção siderúrgica, e enfrenta desafios na transição para tecnologias de fabricação mais sustentáveis (Islam, 2024).

Sob essa perspectiva, considerando que o Brasil está entre os maiores produtores de aço do mundo, torna-se então importante compreender e identificar quais os fatores que facilitam a transição para uma siderurgia menos dependente de carvão, as oportunidades a serem exploradas, as ameaças que demandam atenção e as barreiras que ainda dificultam a descarbonização do setor.

Diante desse cenário e da necessidade de tornar a indústria siderúrgica mais sustentável, foi possível formular a seguinte questão pesquisa: **Qual poderia ser a estratégia mais adequada para viabilizar o desenvolvimento da produção de aço verde no Brasil, com foco no hidrogênio verde e na energia eólica *offshore*?** Para respondê-la, este artigo tem como objetivo traçar um panorama do desenvolvimento da produção de aço verde no país, utilizando a análise SWOT para identificar forças, fraquezas, oportunidades e ameaças, e, a partir disso, definir um diagnóstico estratégico para a transição do setor no país.

Logo, se comparado com estudos anteriores como o de Venkataraman *et al.* (2022), que analisaram a viabilidade tecnológica e as oportunidades da Austrália na transição para a produção de aço de emissão zero, este artigo se diferencia ao diagnosticar a situação estratégica do Brasil diante do desenvolvimento do aço verde e avaliando os desafios e as condições atuais do país por meio de uma abordagem sistemática. Além disso, também diferente do estudo de Ariyama *et al.* (2019), que forneceram uma visão técnica sobre o potencial de mitigação de CO<sub>2</sub> na siderurgia ao avaliar as oportunidades de tecnologias emergentes e suas projeções até 2050, este estudo destaca e identifica os fatores que determinam a posição do Brasil em um cenário de pressão para a descarbonização, proporcionando um retrato das condições nacionais antes da adoção de novas tecnologias.

Sendo assim, além desta introdução, que contextualiza o tema, delimita o objetivo e a questão de pesquisa, o artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o referencial teórico; a Seção 3 discute os resultados, explorando o estado da arte do aço verde, a análise SWOT e o diagnóstico estratégico; por fim, a Seção 4 traz as considerações finais, evidenciando as principais contribuições do estudo e sugestões para pesquisas futuras.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Fundamentos de Gestão Estratégica

A Gestão Estratégica envolve a integração dinâmica de conceitos e ferramentas que permitem avaliar o cenário organizacional e orientar as decisões estratégicas. De acordo com Porter (1980), a competição é um elemento essencial nas relações de mercado, pois exige das organizações um posicionamento estratégico baseado na identificação e exploração de suas vantagens competitivas, diferenciais, desafios e tendências do setor.

Nesse contexto, diversas metodologias são empregadas para interpretar o ambiente organizacional de forma estratégica, como as 5 Forças de Porter (Concorrência, Novos Entrantes, Fornecedores, Poder dos Clientes e Substitutos), as três estratégias competitivas (Liderança em Custo, Diferenciação e Enfoque), a análise da Cadeia de Valor, a Matriz de Ansoff e a análise SWOT (Porter, 1980; Porter, 1985; Ansoff, 1987).

## 2.2 Análise SWOT

A análise SWOT trata-se de uma metodologia estratégica que é estruturada por meio de uma matriz 2x2, na qual os quadrantes categorizam os fatores provenientes do ambiente interno, representados pelas forças (S de *strengths*) e fraquezas (W de *weaknesses*), e do ambiente externo, que inclui as oportunidades (O de *opportunities*) e ameaças (T de *threats*) (Chiavenato; Sapiro, 2004; ABRAPP, 2007).

Na metodologia SWOT, as forças representam as vantagens internas da organização, derivadas de seus recursos e alinhadas à sua razão de ser e objetivos. Em contrapartida, as fraquezas correspondem às desvantagens internas que podem comprometer seu desempenho. As oportunidades são circunstâncias ou fatores, presentes ou futuros, que favorecem a superação de desafios e o alcance dos objetivos organizacionais, enquanto as ameaças representam elementos externos que podem impor dificuldades à execução das atividades e metas estabelecidas. A intensidade dos fatores analisados nesses quadrantes orientará a definição da postura estratégica mais adequada, direcionada para um dos quatro objetivos estratégicos: manutenção, desenvolvimento, crescimento ou sobrevivência, melhor definidos a seguir conforme ABRAPP (2007).

## 2.3 Hidrogênio Verde e Aço Verde

O hidrogênio verde é aquele produzido por meio do processo de eletrólise da água movida a energia renovável (Kojima *et al.*, 2023). O processo de eletrólise é um processo tecnológico que tem como objetivo dividir a água em gases verdes ( $H_2$  e  $O_2$ ), a fim de ser utilizado como matéria-prima e transportadora de energia em aplicações, como na indústria química, de transporte, siderúrgicas e setores de energia (Yu; Budiyo; Tüysüz, 2022).

No processo de produção do aço verde, o hidrogênio verde, derivado da eletricidade renovável desempenha um papel importante, pois, uma das etapas de produção de aço é o “refino”, onde ocorre a remoção do carbono. O hidrogênio ao reagir com o carbono produz água ( $H_2O$ ) e o  $CO_2$ , que antes era emitido para a atmosfera, deixa então de existir (Galitskaya; Zhdaneev, 2022). Uma vez que o uso do hidrogênio verde é inserido no processo produtivo do aço, passa-se então a existir o que se conhece por “Aço verde”.

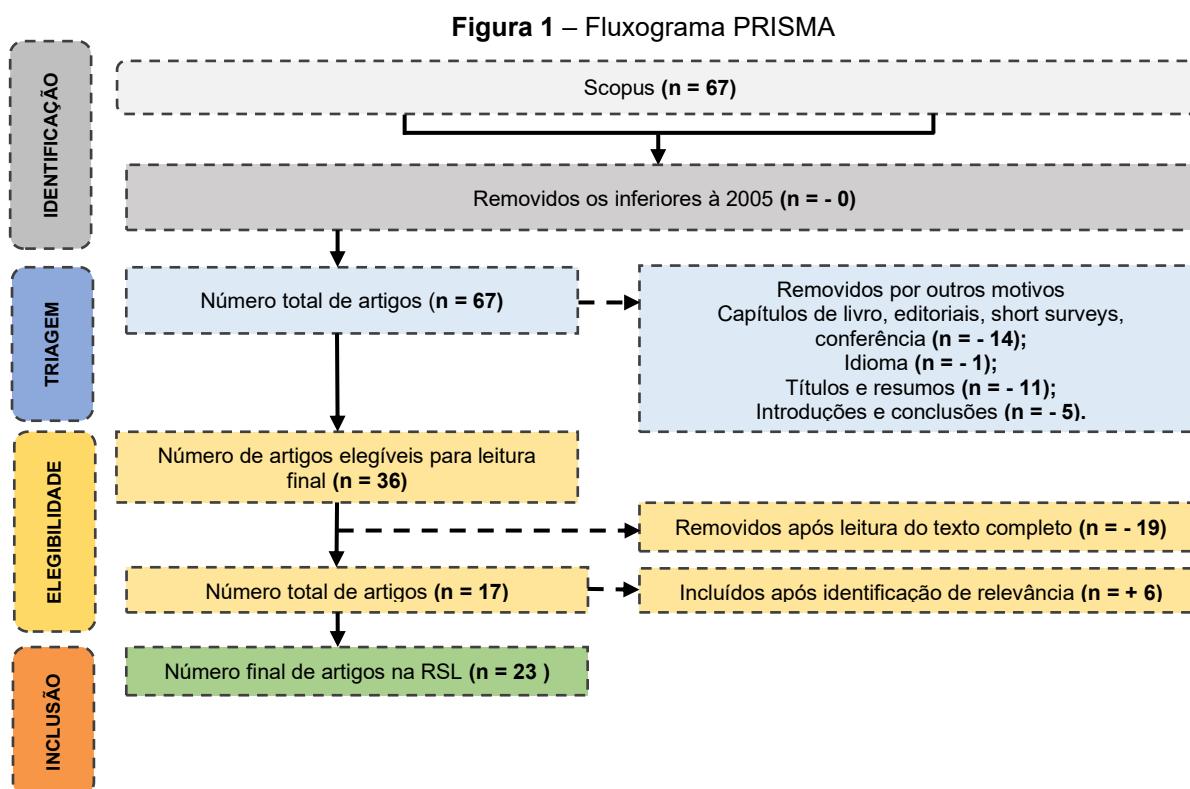
O aço verde representa um novo processo de produção de aço que reduz as emissões de gases de efeito estufa, através de um processo com eletrólise de óxido fundido e o uso inteligente de ligas de ferro-cromo, que resulta na geração de subprodutos que podem reduzir as emissões de  $CO_2$  ao substituir recursos em outras indústrias (Singh; Rout, 2018).

Para uma produção de aço verdadeiramente verde, é necessários o uso de dois recursos: energia elétrica proveniente de fontes renováveis (Souza Filho *et al.*, 2023) e hidrogênio derivado de eletricidade renovável (hidrogênio verde), que também deve ser empregada para fornecer o agente redutor necessário para remover o oxigênio do óxido de ferro (Galitskaya; Zhdaneev, 2022).

### 3. MÉTODO DO ESTUDO

Para que a construção deste trabalho se tornasse efetiva em seu objetivo, foram adotadas duas etapas principais: (1) a revisão de literatura, baseada na análise de cenários, triagem e cruzamento de informações para a elaboração e discussão dos resultados; e (2) a análise de dados a partir de cenários formulados com base nos achados da literatura.

A revisão foi conduzida com base no método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). Para a triagem e seleção de documentos, foi utilizada a base de dados da *Scopus*, cujas *strings* de buscas foram “*steel production*” AND “*hydrogen*” AND “*renewable energy*”. Na etapa de seleção foram consideradas apenas publicações em inglês, abrangendo um período de 20 anos, de janeiro de 2005 a fevereiro de 2025. O diagrama apresentado na Figura 1 ilustra todo o processo de busca, seguindo as etapas recomendadas pelo protocolo PRISMA, que tem sido amplamente reconhecido e utilizado para revisões sistemáticas dessa natureza.



Fonte: Autores (2025)

Após a sistematização da literatura, foi elaborado um construto teórico-conceitual, desenvolvido a partir da classificação e organização das principais temáticas identificadas na literatura sobre a produção de aço verde com o uso de hidrogênio verde.

A partir da elaboração do construto, foi originada a matriz SWOT, que relaciona os principais aspectos considerados forças, fraquezas, oportunidades e ameaças à produção de aço verde. A construção da matriz SWOT foi embasada nos trabalhos de Chiavenato e Sapiro (2004) e no Manual de Planejamento Estratégico da Associação Brasileira das Entidades Fechadas de Previdência Complementar (ABRAPP, 2007). De acordo com esses estudos, a análise desses fatores deve permitir a definição da postura estratégica mais adequada, considerando as características do ambiente interno e externo, conforme dispostas na matriz SWOT. Essa postura estratégica orientará a formulação do diagnóstico estratégico.

Assim, para definir a postura estratégica do país em relação à produção de aço verde, o primeiro passo é cruzar os pontos listados na matriz SWOT, atribuindo pesos que definem a relação entre cada um deles. Em seguida, realiza-se a soma de cada cruzamento e analisa-se qual quadrante obteve o maior resultado. O maior valor identificado indicará o diagnóstico situacional da localidade e a postura estratégica a ser adotada. O Quadro 1 apresenta o modelo da matriz de estratégias resultante do

cruzamento dos pontos da matriz SWOT. Já o Quadro 2 apresenta as pontuações atribuídas aos cruzamentos entre os elementos listados na matriz.

**Quadro 1 – Matriz SWOT de definição de estratégias**

		Ambiente interno	
		Fraquezas	Forças
Ambiente externo	Ameaças	Sobrevivência	Manutenção
	Oportunidades	Crescimento	Desenvolvimento

Fonte: ABRAPP (2007)

**Quadro 2 – Pontuação e grau de impacto entre os fatores listados na matriz SWOT**

Pontuação	FxO/A e FxO/A
	Grau de impacto
1	Não significativo
3	Pouco significativo
5	Significativo
7	Muito significativo
9	Extremamente significativo

Fonte: Adaptado de ABRAPP (2007)

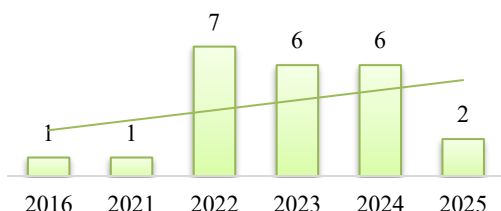
## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Estado da arte e aspectos considerados na produção de aço verde

A pesquisa em aço verde tem apresentado uma tendência de crescimento nos últimos anos, de modo que, na análise biométrica dos anos de publicação, é possível observar um pico em 2022, seguido por uma estabilização em 2023 e 2024. Esse crescimento indica a iminência do aumento do interesse acadêmico e tecnológico em pesquisas que evidenciem o uso do hidrogênio verde para a produção de aço, impulsionado por avanços técnicos e políticas de descarbonização. A Figura 2 ilustra a tendência de publicações analisadas.

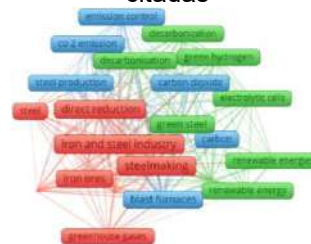
A análise dos artigos também permitiu construir um gráfico de redes de palavras-chave utilizando o VOSviewer, que originou a existência de três *clusters* principais. O *cluster* vermelho concentra termos ligados à produção siderúrgica tradicional, como *steelmaking*, *iron and steel industry* e *direct reduction*, evidenciando a base do setor. O azul foca nas emissões de carbono, com palavras como *CO<sub>2</sub> emission* e *carbon dioxide*, destacando a preocupação ambiental. Já o verde está associado à transição sustentável, trazendo *green hydrogen*, *renewable energy* e *electrolytic cells*, indicando o papel crescente do hidrogênio verde e das energias renováveis na produção de aço. A Figura 3 ilustra o gráfico criado.

**Figura 2 – Distribuição do número de artigos por ano**



Fonte: Autores (2025)

**Figura 3 – Rede de palavras-chave mais citadas**



Fonte: Autores (2025)

A partir da sistematização de conteúdo, foi possível identificar oito categorias que refletem como a produção de aço verde, viabilizada pelo uso de hidrogênio verde, tem sido abordada na literatura. Essas categorias são: Tecnologias de produção; Redução de emissões e sustentabilidade; Eficiência energética e infraestrutura; Alternativas de matérias-primas e recursos; Desafios no armazenamento e transporte de hidrogênio; Políticas e regulações governamentais; Dinâmica de mercado e economia global; Transição energética global.

É importante destacar que a definição desses agrupamentos e a definição das áreas-chave foram necessárias para fundamentar o preenchimento da matriz SWOT desenvolvida, uma vez que permitiram estruturar os aspectos e fatores envolvidos na transição para a produção de aço verde. A Tabela 1 detalha o construto desenvolvido, evidenciando os agrupamentos definidos e por quais autores eles foram mencionados.

**Tabela 1 – Construto teórico de áreas chave**

	Tecnologia de Produção	Redução de Emissões e Sustentabilidade	Eficiência Energética e Infraestrutura	Alternativas de Matérias-Primas e Recursos	Desafios no Armazenamento e Transporte de Hidrogênio	Políticas e Regulações Governamentais	Dinâmica de Mercado e Economia Global	Transição Energética Global
(Baasch, 2024)	✓							✓
(Bilici <i>et al.</i> , 2024)							✓	
(Boretti, 2023)					✓	✓	✓	
(Islam, 2024)			✓			✓	✓	
(Lee, 2023)	✓							✓
(Massuque <i>et al.</i> , 2023)				✓				
(Metolina <i>et al.</i> , 2024)	✓						✓	✓
(Mousa <i>et al.</i> , 2016)	✓		✓					
(Neumann <i>et al.</i> , 2024)	✓			✓				
(Onwuemezie; Darabkhanie, 2024)			✓					✓
(Palone <i>et al.</i> , 2022)		✓						
(Shen <i>et al.</i> , 2025)	✓							
(Shukla, 2022)		✓		✓				
(Wang <i>et al.</i> , 2021)			✓		✓			
(Wang <i>et al.</i> , 2022)	✓		✓					
(Wang <i>et al.</i> , 2023)		✓				✓		✓
(Wang <i>et al.</i> , 2024)	✓							

Fonte: Autores (2025)

No que se refere à primeira categoria, Tecnologias de Produção, a literatura tem evidenciado a necessidade de que se desenvolvam novas rotas tecnológicas que utilizem hidrogênio verde como agente redutor. Estudos como o de Palone *et al.* (2022) indicam que a substituição do carvão pelo hidrogênio na redução direta do ferro (DRI) pode viabilizar uma descarbonização quase completa, desde que associada à eletricidade livre de carbono. No entanto, a viabilidade dessa rota depende de avanços na adaptação da infraestrutura industrial, como a implementação de eletrolisadores e no desenvolvimento de estratégias para otimizar o consumo energético do processo (Islam, 2024).

A segunda categoria, Redução de emissões e sustentabilidade, traz o desafio da descarbonização da siderurgia devido à sua histórica dependência do carvão (Lee, 2023). Nesse contexto, Pang *et al.* (2024) demonstram que a substituição dos altos-fornos tradicionais pelo processo DRI-EAF movido a hidrogênio pode reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em até 86%. Além disso, estratégias que auxiliem no beneficiamento de minérios são necessárias para reduzir a pegada de carbono ao longo da cadeia produtiva (Aydogdu *et al.*, 2024).

No que tange à terceira categoria, a literatura evidencia a Eficiência Energética e Infraestrutura, onde os desafios associados ao suprimento energético para a produção de aço verde se destacam. A eletrólise da água, necessária para a geração de hidrogênio, exige alta disponibilidade de eletricidade renovável (Onwuemezie; Darabkhanie, 2024), enquanto o estágio de redução do ferro necessita de alta demanda energética. Estudos como o de Wang *et al.* (2024) apontam que a expansão de fontes limpas, como solar e eólica, é necessária para tornar essa transição viável.

A quarta categoria evidenciada pela literatura destaca Alternativas de Matérias-Primas e Recursos, trazendo o potencial de resíduos agrícolas e biomassa como substitutos parciais dos combustíveis fósseis na siderurgia. Segundo Shukla (2022), o uso gradual desses materiais ao carvão mineral e ao hidrogênio verde pode contribuir para uma transição sustentável, reduzindo as emissões associadas ao uso de coque.

A literatura também evidencia desafios relacionados ao Armazenamento e Transporte de Hidrogênio, que foram classificadas na quinta categoria, que trata da baixa estabilidade e a elevada permeabilidade do hidrogênio em materiais metálicos, fatores que complicam sua armazenagem e transporte seguro (Wang *et al.*, 2021). Além disso, questões políticas e regulatórias, bem como a dinâmica de mercado, são fatores importantes para a viabilidade econômica do aço verde. Ferramentas como subsídios e linhas de crédito com juros reduzidos podem mitigar riscos e estimular investimentos no setor (Wang *et al.*, 2023). Paralelamente, o comércio global de ferro verde também é visto como um ator na redução dos custos médios de produção, podendo tornar a siderurgia de baixo carbono mais competitiva a longo prazo (Bilici *et al.*, 2024).

#### 4.1 Análise SWOT e diagnóstico estratégico do panorama nacional em aço verde

O objetivo da análise SWOT desenvolvida é identificar os fatores que podem tanto viabilizar quanto dificultar a produção de aço verde no Brasil. Por um lado, a matriz considera as oportunidades e os elementos favoráveis que podem impulsionar essa transição no país. Por outro, avalia os desafios e obstáculos que podem retardar ou até mesmo desestimular sua implementação. O Quadro 3 apresenta a matriz SWOT construída com base nas informações evidenciadas pela análise da literatura.

**Quadro 3 – Matriz SWOT**

<b>Ambiente interno</b>	
<b>Forças</b>	<b>Fraquezas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Aço verde com hidrogênio e eletricidade renovável permite a descarbonização do setor;</li> <li>➤ Ferro produzido com hidrogênio verde gera apenas água como subproduto;</li> <li>➤ Redução quase total das emissões de Gases de Efeito Estufa com hidrogênio e eletricidade limpa;</li> <li>➤ Desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono impulsionado pela siderurgia;</li> <li>➤ Abundância de minério de ferro e proximidade das siderúrgicas;</li> <li>➤ O Brasil tem grande potencial para geração de energia renovável em larga escala.</li> <li>➤ O Brasil possui o menor custo nivelado de hidrogênio verde do mundo pela competitividade do preço da eletricidade renovável.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Incerteza na produção de hidrogênio e dependência econômica, tecnológica e de infraestrutura;</li> <li>➤ Grandes investimentos em energia renovável são necessários;</li> <li>➤ Desafio de manter baixo consumo de energia e emissões sem comprometer a qualidade do metal;</li> <li>➤ Armazenamento de hidrogênio apresenta desafios técnicos;</li> <li>➤ Alto consumo de hidrogênio aumenta a demanda por processos de eletrólise;</li> <li>➤ Baixo número de projetos piloto e pesquisas aplicadas na produção de aço verde.</li> </ul>
<b>Ambiente externo</b>	
<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Expansão do comércio internacional de ferro verde fortalece exportações;</li> <li>➤ Políticas de países podem gerar obrigatoriedade no comércio do aço sem carbono até 2050;</li> <li>➤ Integração do hidrogênio impulsiona avanços econômicos e tecnológicos;</li> <li>➤ Incentivos governamentais estrangeiros reduzem custos de financiamento;</li> <li>➤ Infraestrutura portuária e logística intercontinental favorável para exportação;</li> <li>➤ Aumento de competitividade da energia eólica offshore global como viabilizadora do hidrogênio verde.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Escalabilidade internacional do comércio do hidrogênio ainda é incerta;</li> <li>➤ Alto custo do hidrogênio verde nos países pioneiros impacta projetos de outros países com maior potencial;</li> <li>➤ Continuidade com incentivos fiscais ao carvão mineral e gás natural dificultam a descarbonização;</li> <li>➤ Adaptação estrutural necessária para uso de hidrogênio verde;</li> <li>➤ Volatilidades de políticas de comércio exterior.</li> <li>➤ Concorrência de países que já avançaram na produção de aço verde.</li> </ul>

Fonte: Autores (2025)

Com base na análise da matriz SWOT, é possível observar que o Brasil possui vantagens estratégicas para se tornar um ator de destaque na produção de aço verde, seja internamente ou como fornecedor de matérias-primas para outros países. A abundância de minério de ferro, a vasta predisposição para geração de energia renovável e o desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono criam um cenário favorável para a descarbonização do setor siderúrgico. Além disso, a crescente pressão internacional para a redução de emissões e a expansão do comércio de ferro verde representam oportunidades que podem ser potencializadas por meio de incentivos governamentais, políticas públicas e investimentos em infraestrutura para produção, armazenamento e transporte de hidrogênio verde.

Logo, a integração do hidrogênio com a matriz energética nacional e o avanço da energia eólica *offshore*, sobretudo no Nordeste do país, surgem como elementos-chave para viabilizar essa transição de forma competitiva. No entanto, alguns desafios estruturais ainda precisam ser superados. A incerteza sobre a escalabilidade do hidrogênio verde, os altos custos envolvidos na eletrólise e a necessidade de grandes investimentos em infraestrutura podem limitar a competitividade do aço verde frente às rotas tradicionais baseadas em carvão. Além disso, a concorrência global com países que já avançaram na implementação dessas tecnologias pode dificultar a inserção do Brasil nesse mercado.

Assim sendo, considerando a elaboração da matriz SWOT, para definir o diagnóstico estratégico é necessário realizar a análise cruzada dos principais fatores identificados. Esse cruzamento permite estruturar uma matriz de estratégias direcionais, delineando ações para potencializar oportunidades e mitigar desafios. A Tabela 2 apresenta o modelo resultante dessa etapa, evidenciando o diagnóstico formulado a partir dos elementos da matriz SWOT.

**Tabela 2 – Resultado do cruzamento entre os quadrantes da matriz SWOT**

		Oportunidades						Ameaças						
		Forças	1	2	3	4	5	6	Forças	1	2	3	4	5
Quadrante de desenvolvimento	1	9	7	7	5	9	7	1	1	7	3	5	5	7
	2	5	7	5	3	3	5	2	5	5	5	7	3	7
	3	5	7	5	7	7	7	3	3	5	7	7	3	5
	4	5	5	5	5	7	7	4	3	5	5	3	7	5
	5	9	7	3	7	5	5	5	1	5	5	7	1	1
	6	5	7	3	5	9	7	6	1	5	1	5	1	1
	7	9	7	5	7	7	7	7	5	5	7	7	5	7
<b>Total</b>		<b>258</b>						<b>188</b>						
		Oportunidades						Ameaças						
		Fraquezas	1	2	3	4	5	6	Fraquezas	1	2	3	4	5
Quadrante de crescimento	1	7	3	3	3	1	5	1	9	7	5	7	1	3
	2	5	3	5	7	3	5	2	5	5	3	5	3	3
	3	1	3	3	5	1	7	3	1	3	3	3	3	3
	4	5	5	5	3	5	7	4	5	5	5	5	1	3
	5	3	7	5	5	5	9	5	3	7	3	3	3	3
	6	1	7	7	5	1	5	6	5	3	5	5	5	3
	7	9	7	5	7	7	7	7	5	5	7	7	5	7
<b>Total</b>		<b>160</b>						<b>126</b>						

Fonte: Autores (2025)

Com base nos dados levantados, é possível identificar que, como diagnóstico estratégico estabelecido, o ambiente interno do Brasil possui características em que predominam os pontos fortes, enquanto no ambiente externo prevalecem as oportunidades. Com isso, infere-se que, como diagnóstico estratégico, o ambiente interno é favorável tanto para o desenvolvimento do hidrogênio verde quanto para a produção de aço verde. Além disso, os fatores inerentes ao país, como: seu segmento industrial, suas qualidades e características são suficientemente fortes ou maduros para aproveitar essas oportunidades.

Nesta perspectiva, a postura estratégica a ser estabelecida deve partir da premissa de que, para que o hidrogênio verde se desenvolva por completo e facilite a produção de aço verde, objetivos e metas estratégicas devem ser traçados e definidos para o desenvolvimento da produção. Essa situação é definida em virtude da potencialização das características do país, que poderá aproveitar plenamente o ambiente externo favorável em função de suas fortalezas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando o objetivo deste estudo, o qual por meio das contribuições da literatura e da aplicação da matriz SWOT, buscou identificar a estratégia mais eficaz para viabilizar e impulsionar a produção de aço verde no Brasil, com foco em hidrogênio verde e energia eólica *offshore*, verificou-se que os pontos fortes e as oportunidades desse novo modelo produtivo se sobrepõem-se as fraquezas e ameaças. Esse cenário ressalta a viabilidade de um caminho promissor, que alia sustentabilidade e crescimento econômico para um setor de grande relevância no país, mas historicamente associado a altos níveis de emissões de Gases de Efeito Estufa.

Nesse contexto, conforme explorado e constatado neste estudo, a abundância de minério de ferro no território nacional, aliada ao ambiente favorável e em expansão para a produção de energia renovável, somada ao crescente interesse global na descarbonização do setor, demonstra que avanços econômicos e tecnológicos, incentivos governamentais e mecanismos de financiamento fortalecem a integração entre hidrogênio verde, energia eólica *offshore* e a indústria do aço.

Por outro lado, apesar desse cenário positivo, desafios ainda precisam ser superados, como a necessidade de uma infraestrutura robusta e interconectada para a produção de hidrogênio, os altos investimentos em energia renovável, a manutenção da qualidade do metal e a escassez de projetos-piloto e pesquisas aplicadas sobre aço verde.

Sendo assim, no campo acadêmico, a análise estratégica do aço verde contribui para a ampliação do conhecimento e fomenta novas abordagens e iniciativas. Para a sociedade, reforça que a adoção de tecnologias limpas pode reduzir impactos ambientais, promovendo melhorias na qualidade de vida e impulsionando o desenvolvimento sustentável. Já para a indústria, fornece embasamento teórico para o direcionamento de investimentos, inovação, infraestrutura e qualificação profissional, fatores essenciais para a transição rumo a um modelo produtivo mais sustentável e competitivo.

No que diz respeito às limitações deste estudo, é importante destacar que os dados e projeções consideraram informações disponíveis até o momento da análise, estando sujeitos a mudanças decorrentes de oscilações do mercado, novas políticas ou avanços tecnológicos futuros. Além disso, a matriz SWOT, apesar de ser uma ferramenta robusta para diagnóstico estratégico, depende da interpretação dos pesquisadores, não sendo totalmente isenta de subjetividade.

Vale ressaltar que a escassez de pesquisas aplicadas sobre a produção de aço verde no Brasil representa uma lacuna que dificulta a superação dos desafios desse setor. Diante disso, estudos futuros podem explorar a formulação de indicadores que mensuram a adequação do aço aos critérios de zero emissão de CO<sub>2</sub>, o que pode contribuir para diferenciar práticas sustentáveis de possíveis casos de *greenwashing*. Além disso, estudar a análise de patentes relacionadas às tecnologias do aço verde, com o objetivo de avaliar o grau de inovação na indústria e identificar tendências tecnológicas emergentes.

## AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), chamada 406746/2022-2, processo 406746/2022-2, ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) – TED No. 11355260 da Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – SETEC, e ao governo do estado do Rio Grande do Norte, por meio da SIN e SEDEC, Convênio Nº 002/2023 pelo apoio à pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ABRAPP – Associação Brasileira das Entidades Fechadas de Previdência Complementar. **Construção do planejamento e gestão estratégica**: manual aplicado às entidades fechadas de previdência complementar. São Paulo: ABRAPP, 2007.

ANSOFF, I. **Strategic management**. 2. ed. New York: Palgrave Macmillan, 1987.

ARIYAMA, Tatsuhiro et al. Diversification of the ironmaking process toward the long-term global goal for carbon dioxide mitigation. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 5, p. 276-294, 2019.

AYDOGDU, K.; DUZGUN, S. Emission Impacts of Direct Reduced Iron-Ore Processing Systems: A

Systems Thinking Approach in Case Studies of Canada and Peru. *steel research international*, p. 2400450.

BAASCH, S.; MASCHKE, J.; BUHK, J.. An (in-) just transition? Sociotechnical imaginaries of the "green" hydrogen and steel transition in Bremen, Germany. **Futures**, v. 164, p. 103489, 2024.

BILICI, S. et al. Global trade of green iron as a game changer for a near-zero global steel industry?- A scenario-based assessment of regionalized impacts. **Energy and Climate Change**, v. 5, p. 100161, 2024.

BORETTI, A. The perspective of hydrogen direct reduction of iron. **Journal of Cleaner Production**, v. 429, p. 139585, 2023.

CHIAVENATO, I.; SAPIRO, A. **Planejamento estratégico: Fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

GALITSKAYA, E.; ZHDANEEV, O. Development of electrolysis technologies for hydrogen production: A case study of green steel manufacturing in the Russian Federation. **Environmental Technology & Innovation**, v. 27, p. 102517, 2022.

GONZÁLEZ, M.O.A.; JONES, D.; SANTISO, A.M.; AKBARI, N.; MELO, D.C.; NOGUEIRA, L.P.; VASCONCELOS, R. M. Offshore wind and energy transition: lessons learned, progress, and trends, **Annual Review of Environment and Resources**, 111523, 2025.

ISLAM, Md Ziaul. Europe's policy transition toward green steel development: Prospective and challenges. **International Journal of Green Energy**, v. 22, n. 2, p. 288-306, 2024.

KOJIMA, Hirokazu et al. Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production. **international journal of hydrogen energy**, v. 48, n. 12, p. 4572-4593, 2023.

LEE, H. Decarbonization strategies for steel production with uncertainty in hydrogen direct reduction. **Energy**, v. 283, p. 129057, 2023.

MASSUQUE, J. et al. Evaluating the potential of non-commercial Eucalyptus spp. and Corymbia spp. for bioenergy in Brazil. **BioEnergy Research**, v. 16, n. 3, p. 1592-1603, 2023.

METOLINA, P. et al. Multiscale modeling of non-catalytic gas-solid reactions applied to the hydrogen direct reduction of iron ore in moving-bed reactor. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 62, p. 1214-1230, 2024.

MOUSA, Elsayed et al. Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 65, p. 1247-1266, 2016.

NEUMANN, J. et al. Thermodynamic assessment of an iron-based circular energy economy for carbon-free power supply. **Applied Energy**, v. 368, p. 123476, 2024.

ONWUEMEZIE, L.; DARABKHANI, H. G. Thermophotovoltaics (TPVs), solar and wind assisted hydrogen production and utilisation in iron and steel industry for low carbon productions. **Journal of Cleaner Production**, v. 443, p. 140893, 2024.

PALONE, O. et al. Assessment of a multistep revamping methodology for cleaner steel production. **Journal of Cleaner Production**, v. 381, p. 135146, 2022.

PANG, Zhuogang et al. The Low-Carbon Production of Iron and Steel Industry Transition Process in China. **Steel research international**, v. 95, n. 3, p. 2300500, 2024.

PORTER, M. E. **Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance**. New York: Free Press, 1985.

PORTER, M. E. **Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors**. New York: Free Press, 1980.

SHEN, J.; ZHANG, Q.; TIAN, S. Decarbonization pathways analysis and recommendations in the green steel supply chain of a typical steel end user-automotive industry. **Applied Energy**, v. 377, p. 124711,

2025.

SHUKLA, I. Potential of renewable agricultural wastes in the smart and sustainable steelmaking process. **Journal of Cleaner Production**, v. 370, p. 133422, 2022.

SINGH, J. K.; ROUT, A. K. Advances in green steel making technology-a review. **Am. J. Mater. Eng. Technol**, v. 6, n. 1, p. 8-13, 2018.

SOUZA FILHO, I. R. et al. Fundamentals of green steel production: on the role of gas pressure during hydrogen reduction of iron ores. **Jom**, v. 75, n. 7, p. 2274-2286, 2023.

VENKATARAMAN, Mahesh et al. Zero-carbon steel production: the opportunities and role for Australia. **Energy Policy**, v. 163, p. 112811, 2022.

WANG, Changlong et al. Green steel: Synergies between the Australian iron ore industry and the production of green hydrogen. **International journal of hydrogen energy**, v. 48, n. 83, p. 32277-32293, 2023.

WANG, Linwei; WANG, Guoling; LI, Shiyuan. Energy and exergy analyses of hydrogen direct reduction iron by the fluidized bed. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 80, p. 779-787, 2024.

WANG, R. R. et al. Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 329, p. 129797, 2021.

WANG, Xiaoyang et al. An integrated analysis of China's iron and steel industry towards carbon neutrality. **Applied Energy**, v. 322, p. 119453, 2022.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World Steel in Figures 2024**. Bruxelas: World Steel Association, 2024. Disponível em: <<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>>. Acesso em: 02 jan. 2024.

YU, M.; BUDIYANTO, E.; TÜYSÜZ, H. Principles of water electrolysis and recent progress in cobalt-, nickel-, and iron-based oxides for the oxygen evolution reaction. **Angewandte chemie international edition**, v. 61, n. 1, p. e202103824, 2022.

# **MINERAÇÃO DE BITCOIN COMO TECNOLOGIA DE APRIMORAMENTO DA REDE: UMA SOLUÇÃO DE CARGA FLEXÍVEL PARA A GERAÇÃO EÓLICA NO BRASIL**

**Paulo Henrique Momm Paganelli (\*)**

Vextron Tecnologia Ltda.; paulo.paganelli@vextron.com.br

**Luciano Benvenuti Roncalio (\*\*)**

Vextron Tecnologia Ltda; luciano.roncalio@vextron.com.br

## **RESUMO**

O crescimento exponencial da energia eólica no Brasil, especialmente na região Nordeste, trouxe novos desafios técnicos para o setor. A variabilidade e a intermitência dessas fontes aumentam a complexidade da operação do sistema elétrico, impactando o equilíbrio da rede, a estabilidade e o aproveitamento da energia gerada. Este artigo propõe o emprego de data centers de mineração de Bitcoin como uma inovadora Tecnologia de Aprimoramento da Rede (do inglês, GET - Grid-Enhancing Technology), funcionando como uma carga flexível capaz de mitigar esses problemas. Abordaremos os benefícios técnicos e econômicos dessa integração, associados à estabilização do sistema e à aceleração da implantação de energias renováveis. Concluímos que a mineração de Bitcoin possui um potencial substancial para otimizar a rede elétrica brasileira e rentabilizar ativos subutilizados de geração eólica.

Palavras-chave: Data center. Bitcoin. Curtailment. Geração Eólica. Carga flexível. HPC (High Performance Computing). GET (Grid Enhancing Technologies).

## **ABSTRACT**

The exponential growth of wind power in Brazil, particularly in the Northeast, has introduced new technical challenges to the power sector. The variability and intermittency of these renewable sources increase the complexity of grid operations, affecting network balance, system stability, and the full utilization of generated energy. This paper proposes the use of Bitcoin mining data centers as an innovative Grid-Enhancing Technology (GET), acting as a flexible load capable of mitigating these issues. We examine the technical and economic benefits of this integration, highlighting its role in system stabilization and in accelerating the deployment of renewable energy. We conclude that Bitcoin mining holds significant potential to optimize the Brazilian electrical grid and monetize underutilized wind generation assets.

Keywords: Datacenter. Bitcoin. Curtailment. Wind power generation. Flexible load. HPC (High Performance Computing). GET (Grid-Enhancing Technologies).

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. O Crescimento da Energia Renovável e Seus Impactos na Rede

A matriz energética global está em uma fase de transformação sem precedentes, com a energia renovável assumindo um papel cada vez mais central. Globalmente, a energia eólica e solar são as formas dominantes nos novos investimentos em geração de eletricidade. No Brasil, essa tendência é igualmente pronunciada. O país tem se consolidado como um líder global em energia renovável, com a região Nordeste emergindo como um polo de desenvolvimento eólico.

Embora o avanço das energias renováveis seja uma vitória para a descarbonização e a sustentabilidade, essa rápida expansão de fontes intermitentes introduz desafios complexos para a operação e estabilidade das redes elétricas. A infraestrutura de rede, tradicionalmente projetada para fontes de geração despacháveis, está diante de uma mudança fundamental no paradigma de gestão de sistemas de energia. A flexibilidade, que antes era fornecida pelo lado da oferta, por meio de usinas controláveis, agora precisa ser cada vez mais buscada no lado da demanda para garantir o equilíbrio e a estabilidade da rede.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. O Problema do Curtailment no Brasil: Definição, Tipos e Consequências

Um dos problemas mais complexos decorrentes da natureza intermitente da geração por tecnologias renováveis como eólica e solar é o curtailment. Este é definido como "uma redução na produção de um gerador em relação ao que ele poderia produzir, dadas as fontes disponíveis, geralmente de forma involuntária". No contexto brasileiro, curtailment é descrito como a "redução forçada da geração, mesmo quando há disponibilidade de recurso eólico e capacidade instalada". No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) categoriza o curtailment em três tipos distintos (Itau BBA, 2024):

- Disponibilidade Externa (REL): Restrições decorrentes da indisponibilidade de equipamentos externos à usina, como falhas em linhas de transmissão ou equipamentos em subestações.
- Confiabilidade Elétrica (CNF): Restrições causadas pela insuficiência da rede de transmissão para escoar toda a energia gerada, mesmo com a infraestrutura em pleno funcionamento.
- Razões Energéticas (ENE): Restrições que surgem quando a oferta de energia excede a demanda, resultando em um excedente no balanço energético.

Essas restrições resultam em perdas financeiras significativas para os geradores e representam um desperdício substancial de energia. Globalmente, o problema ganha maiores proporções: em 2021, cerca de 14,9 TWh de geração eólica e solar foram submetidos a curtailment nos EUA, o equivalente a aproximadamente US\$ 610 milhões em receita perdida, um aumento de US\$ 318 milhões em 2017. Essa energia desperdiçada em 2021 seria suficiente para abastecer 1,3 milhão de residências americanas por um ano (Soluna, 2023).

No Brasil, a rápida expansão de fontes intermitentes como a eólica está aprofundando o efeito da "curva do pato", que representa o excesso de geração diurna e picos de demanda noturna, levando a uma crescente volatilidade intradia na geração. Esse desequilíbrio, que representa um risco sistêmico, decorre de fatores como o crescimento das energias renováveis sem a infraestrutura de rede adequada e a falta de flexibilidade do lado da demanda. O curtailment não é apenas uma perda econômica, mas um risco crescente para a estabilidade da rede, como evidenciado pelas operações conservadoras do ONS no Brasil após o evento do apagão de 2023 (Itau BBA, 2024).

O curtailment representa um custo oculto significativo na integração de energias renováveis, e que acabou muitas vezes subestimado nas análises econômicas iniciais dos projetos e na percepção pública. Além disso, as disputas legais em curso no Brasil entre associações de geradores e órgãos reguladores revelam uma desconexão entre os marcos regulatórios e as realidades operacionais, gerando incerteza financeira para os proprietários de ativos renováveis e para os agentes do mercado de capitais.

## **2.2. A Evolução da Flexibilidade na Rede Elétrica Moderna**

A transição energética global para fontes renováveis, como a eólica e a solar, impõe uma reengenharia fundamental dos sistemas de energia. Em redes tradicionais, a flexibilidade era predominantemente fornecida pelo lado da oferta, através de usinas despacháveis. No entanto, em sistemas modernos com alta penetração de fontes variáveis, com características de intermitência e imprevisibilidade, a responsabilidade por essa flexibilidade recai cada vez mais sobre o lado da demanda. A Resposta à Demanda (Demand Response - DR) torna-se um mecanismo necessário para equilibrar oferta e consumo em tempo real, otimizar o uso da infraestrutura existente e evitar interrupções. Essa mudança de paradigma, de controlar a oferta para atender à demanda para gerenciar a demanda para acomodar a oferta variável, é uma transformação profunda de paradigma (Menati et al., 2022).

A digitalização do setor elétrico avança em múltiplas frentes. Além da integração de cargas flexíveis, como a mineração de Bitcoin, experiências brasileiras de comércio peer-to-peer de energia via blockchain mostram como novas arquiteturas digitais podem ampliar a transparência e a eficiência na alocação de recursos energéticos (Cardoso et al., 2022).

## **2.3. Características de uma Carga Flexível Ideal**

Para que uma carga seja considerada um recurso eficaz de Resposta à Demanda, ela deve possuir certas características de consumo de energia que maximizem sua utilidade para a rede (Menati et al., 2022):

- **Intensidade Energética:** Capacidade de reduzir o consumo em um volume capaz de gerar um impacto significativo para a rede.
- **Tempo de Reação:** Capacidade de ajustar o consumo rapidamente, pois desequilíbrios na rede e variações na geração ou na demanda podem ser imprevisíveis e de curta duração.
- **Disponibilidade:** A carga deve estar consistentemente operacional e apta a modular seu consumo quando necessário, especialmente para participação em mercados de capacidade.
- **Custo de Reação:** Os custos associados à redução do consumo devem ser menores do que as compensações recebidas pela flexibilidade.
- **Granularidade de Consumo:** A capacidade de ajustar o consumo de forma controlada e em múltiplos níveis é preferível, permitindo uma modulação da demanda para atender a necessidades específicas da rede.
- **Flexibilidade Geográfica:** A possibilidade da carga poder ser instalada em qualquer lugar onde a flexibilidade seja mais necessária, inclusive em regiões remotas com excesso de geração eólica e outras renováveis, e infraestrutura de transmissão limitada.

Essas características formam o conjunto de critérios pelos quais ponderar a atratividade de uma tecnologia de aprimoramento de rede baseada na demanda. Critérios como "rapidez de reação" e "flexibilidade geográfica" evidenciam que os problemas da rede não se limitam à capacidade, mas abrangem também os desequilíbrios espaciais e temporais.

#### **2.4. Data Centers como Inovadora de Tecnologia de Aprimoramento da Rede (GET)**

Diante desses desafios complexos, a mineração de Bitcoin surge como uma solução promissora. Caracterizada por ser uma carga eletrointensiva, mas com flexibilidade inerente e tolerância a interrupções, ela pode funcionar como uma Tecnologia de Aprimoramento da Rede (GET). A proposta é que a mineração de Bitcoin, em vez de ser vista apenas como um consumidor intensivo de energia, pode transformar os desafios atuais do sistema elétrico em oportunidades de rentabilização, estabilizando o sistema e monetizando a energia que seria desperdiçada. Essa abordagem redefine o papel da mineração de Bitcoin: de um agente passivo de consumo para uma ferramenta estratégica de otimização da rede (Carter et al, 2023).

#### **2.5. Comparativo da Computação Flexível com Outras Tecnologias de Aprimoramento da Rede**

Tradicionalmente, as Tecnologias de Aprimoramento da Rede (GETs) focam na otimização da capacidade de transmissão da rede, como FACTS (Flexible AC Transmission Systems), HVDC (High-Voltage Direct Current) e DLR (Dynamic Line Rating). No entanto, o conceito de GETs se expande para incluir soluções do lado da demanda, como a computação flexível (Mellerud, 2021; K33 Research, 2022).

A computação flexível, incluindo a mineração de Bitcoin, oferece vantagens significativas em comparação com o armazenamento em baterias e a expansão da transmissão:

- **Tempo de implantação:** Centros de computação flexível podem ser instalados em menos de seis meses. A agilidade de implantação é estratégica para atender restrições imediatas da rede.
- **Eficiência energética:** Ao consumir eletricidade diretamente, a computação evita as perdas de ciclo carga/descarga típicas das baterias.
- **Autonomia de duração:** Não há limitação temporal para o consumo, ao contrário das baterias.
- **Modularidade e padronização:** Permite implantação rápida em pequena escala, adaptando-se a diferentes perfis geográficos e operacionais.
- **Autofinanciamento:** Uma característica crucial é que essa solução é autofinanciável, pois, ao gerar ativos digitais com valor de mercado, os datacenters podem ser economicamente viáveis sem subsídios públicos ou repasses tarifários.

As diferenças significativas nos atributos entre as diversas soluções de flexibilidade da rede atuam a favor da computação flexível, especialmente sua capacidade de implantação rápida, que é vital para lidar com os desafios urgentes da rede.

#### **2.6. Conceitos Fundamentais: Proof-of-Work (PoW) e o Processo de Mineração**

Para compreender o papel da mineração de Bitcoin como uma Tecnologia de Aprimoramento da Rede, é essencial entender seus conceitos fundamentais e sua dinâmica energética. O sistema de processamento descentralizado do Bitcoin baseia-se no conceito criptográfico de Proof-of-Work (PoW), que permite que as partes realizem transações sem a necessidade de um terceiro confiável, tornando as transações "computacionalmente impraticáveis de reverter". Um registro público, conhecido como blockchain, é mantido e replicado por membros da rede, e a segurança das transações é garantida por uma cadeia de hashes. Agentes da rede, conhecidos como mineradores, realizam um PoW que é computacionalmente intensivo, que envolve a geração de hashes até que seja encontrado um hash que atenda a um determinado alvo. Esse processo é fundamental para adicionar novos blocos e verificar transações, com os mineradores recebendo Bitcoins recém-emitidos como recompensa.

A mineração é um processo intensivo em energia, é um eletrointensivo. O consumo de energia, no contexto da blockchain do Bitcoin, é uma característica intrínseca do sistema, não um defeito, pois é o que garante a segurança da rede. A demanda de energia para mineração de Bitcoin, frequentemente criticada como desperdício, é, na verdade, uma característica econômica e de segurança fundamental. Os mineradores, para gerar sua receita, precisam executar um processo intensivo em energia, o que, por sua vez, protege a rede. Isso implica que as tentativas de reduzir o consumo de energia do Bitcoin sem alterar seus incentivos econômicos ou modelo de segurança (PoW) provavelmente falharão porque comprometerão sua proposta de valor fundamental. A eletricidade é o que garante a rede e apoia sua moeda nativa, tornando extremamente custoso atacar a rede (Soluna, 2023; Carter et al, 2023; Bendiksen, Gibbons, 2023).

## **2.7. A Mobilidade e a Natureza Não-Sensível ao Tempo da Mineração de Bitcoin**

A mineração de Bitcoin não está vinculada a uma localização física específica. Sua flexibilidade geográfica é uma característica que permite maximizar sua rentabilidade, priorizando regiões com eletricidade abundante e barata, além de condições ambientais favoráveis, como baixa temperatura e umidade.

A natureza "sempre ativa" da demanda por serviços de processamento para a blockchain do Bitcoin é um diferencial. Diferente de muitas cargas industriais que possuem ciclos de produção específicos ou operações sensíveis ao tempo, a mineração de Bitcoin é caracterizada por ser uma computação não sensível ao tempo de disponibilidade ou vinculada ao nível de serviço (SLA – Service Level Agreement). Essa característica, combinada com sua versatilidade geográfica, a torna excepcionalmente adequada para consumir energia quando e onde ela é mais abundante e barata, incluindo energia eólica que de outra forma seria desperdiçada, seja por baixa demanda ou por restrições sistêmicas da rede. A tolerância à interrupções e independência de sincronização temporal, significa que a mineração pode atuar com total flexibilidade para absorver o excesso de energia, uma característica crítica para a integração de renováveis intermitentes. A combinação de mobilidade e operação não sensível ao tempo é um diferencial único da mineração de Bitcoin frente a outros tipos de carga industrial, tornando-a adequada para absorver energia quando e onde ela tem menos valor ou seria desperdiçada (Carter et al, 2023; Bendiksen, Gibbons, 2023).

## **2.8. Características Técnicas da Mineração de Bitcoin como Carga Flexível**

A mineração de Bitcoin apresenta atributos operacionais singulares para atuar como uma carga flexível na rede elétrica, incluindo um conjunto de características técnicas que a posicionam como uma solução promissora para os desafios energéticos atuais (CCAF, 2023; Mellerud, 2021; Menati et al., 2022; Soluna, 2023):

- **Alta Intensidade Energética e Escalabilidade:** A indústria global de mineração de Bitcoin é altamente intensiva em energia, com a eletricidade sendo o maior componente de custo operacional. Estima-se que o setor consuma cerca de 144 TWh anualmente, representando aproximadamente 0.6% do consumo global total de eletricidade. Dada a natureza competitiva da mineração, onde economias de escala são cruciais, as operações tendem a ser de grande porte, frequentemente demandando mais de 100 megawatts (MW), tornando-as ideais para programas de resposta à demanda.
- **Tempo de Reação e Granularidade de Consumo:** Os equipamentos do tipo ASICs (Application-Specific Integrated Circuits) utilizados na mineração são como computadores que podem ter seu consumo de energia ajustado. Softwares especializados permitem que as mineradoras respondam a sinais da rede em questão de minutos (até 5 segundos), comparável às usinas de pico de reação

mais rápida. Essa capacidade de modulação de carga permite que os mineradores forneçam a potência que a rede necessita, ajustando o seu consumo total de energia ligando/desligando lotes de máquinas.

- **Alta Disponibilidade e Tolerância a Interrupções:** A natureza do processo de mineração é não-sensível ao tempo e não-crítica, o que significa que interrupções não resultam em perda de dados ou falhas operacionais. Não há clientes finais ou requisitos de disponibilidade rígidos, o que as torna cargas altamente confiáveis e estáveis para a DR.
- **Baixo Custo de Reação:** O custo de reação para uma mineradora de Bitcoin é mínimo, sendo essencialmente o custo alternativo de não minerar Bitcoin durante o período de desligamento.
- **Flexibilidade Geográfica para Localização Estratégica:** Os únicos requisitos geográficos para uma mineradora de Bitcoin são conexão à internet e acesso à eletricidade a baixo custo. Isso as torna extremamente flexíveis em termos de localização, podendo ser implantadas em regiões remotas onde a energia eólica é abundante e barata, mas com limitações de transmissão.
- **Vantagens Adicionais da Computação Flexível:** A mineração de Bitcoin, como forma de computação flexível, não sofre com perdas de eficiência de ida e volta (roundtrip efficiency loss) como as baterias, pois a eletricidade é consumida diretamente para uma necessidade computacional.

A convergência de atributos técnicos e incentivos econômicos (lucratividade) alinha-se perfeitamente com as necessidades técnicas da rede (flexibilidade, mitigação de curtailment), criando uma sinergia que estabelece a mineração como uma GET de alto valor.

## **2.9. Modelos de Monetização e Integração com a Rede Elétrica**

A flexibilidade da mineração de Bitcoin permite diversos modelos de monetização e integração com as redes elétricas, criando possibilidades para o portfólio dos projetos de energia renovável, especialmente eólicos (Mellerud, 2021; Soluna, 2023):

- **Mineração Responsiva a Preços (Behind-the-Meter - BTM):** Mineradoras de Bitcoin podem ser instaladas diretamente em usinas de energia eólica ou outras renováveis, operando behind-the-meter (BTM). Isso permite que a usina renovável monetize a energia que, de outra forma, seria submetida a curtailment, criando um "piso de preço" e "piso de demanda" para sua eletricidade.
- **Participação em Programas de Resposta à Demanda (Ancillary Services):** Em mercados desregulados, como o ERCOT no Texas, mineradoras de Bitcoin podem atuar como Recursos de Carga (Load Resources - LR), participando de mercados de serviços ancilares.
- **"Power-to-Bitcoin":** Este conceito envolve a conversão de energia elétrica excedente, que não pode ser injetada na rede, em Bitcoin. Diferentemente de outras conversões "power-to-X" (como power-to-hydrogen), o Bitcoin não requer uma rede de distribuição física, pois o ativo digital pode ser transferido via internet, minimizando a necessidade de infraestrutura logística para escoar a produção.

Esses modelos de monetização revelam uma interessante sinergia econômica entre a mineração de Bitcoin e os projetos de energia renovável.

## **3. MÉTODO DO ESTUDO**

O presente estudo adotou uma abordagem qualitativa e exploratória, fundamentada em revisão bibliográfica, análise documental e estudo de caso internacional, com foco no mercado de energia do Estado do Texas, USA. O objetivo foi avaliar a mineração de Bitcoin como Tecnologia de Aprimoramento da Rede (GET) no contexto brasileiro, com ênfase tanto na oportunidade de mitigação do curtailment

de geração eólica no Nordeste quanto como abordagem para acelerar a integração dos novos projetos de geração por energias renováveis.

A metodologia seguiu quatro etapas principais:

### **3.1. Revisão bibliográfica e documental**

Foram analisados relatórios técnicos, artigos científicos e white papers que tratam da mineração de Bitcoin, resposta da demanda, tecnologias de aprimoramento da rede e desafios de integração de renováveis.

### **3.2. Integração de experiências nacionais e internacionais**

O caso do ERCOT (Texas) foi utilizado como referência empírica de integração de cargas flexíveis digitais em mercados desregulados de energia.

### **3.3. Análise comparativa de tecnologias de flexibilidade**

A mineração de Bitcoin foi analisada em comparação com outras GETs tradicionais, como FACTS, HVDC, DLR e sistemas de armazenamento em baterias.

### **3.4. Discussão aplicada ao Brasil**

Os resultados das etapas anteriores foram interpretados à luz da realidade do Sistema Interligado Nacional (SIN), caracterizado pelo crescimento acelerado da geração renovável, desafios da sua integração, ocorrência crescente de curtailment e desafios de transmissão no Nordeste. A partir dessa análise, foram propostas implicações técnicas, regulatórias e econômicas para a eventual institucionalização da mineração de Bitcoin como GET no Brasil.

## **4. ESTUDO DE CASO E APLICAÇÕES PRÁTICAS**

### **4.1. O Precedente Internacional: A Experiência do ERCOT (Texas, EUA)**

O Estado do Texas, EUA, opera um sistema elétrico singular, com uma interconexão independente das demais regiões do país, o que possibilitou a desregulamentação de seu mercado em 2002. O Electric Reliability Council of Texas (ERCOT) atua como Operador Independente do Sistema (ISO), administrando tanto a operação quanto os mercados, nos quais aproximadamente 560 geradores competem e cerca de 120 provedores de varejo atendem aos consumidores. Trata-se de um mercado no qual os sinais de preço em tempo real incentivam a flexibilidade e a resposta da demanda. O Texas é hoje o maior produtor de eletricidade dos Estados Unidos (Mellerud, 2021; ERCOT, 2021).

O mix energético destaca-se pela elevada participação de renováveis variáveis: em 2020, a energia eólica representava 26% da matriz e, em 2021, a solar respondeu por 28% de toda a nova capacidade adicionada nos EUA. Entretanto, grande parte desses recursos está concentrada no Oeste do estado, distante dos principais centros de carga, o que resulta em restrições de transmissão e aumento do curtailment. Essa configuração gera preços médios baixos para consumidores industriais, mas com elevada volatilidade, incluindo eventos de preços negativos e picos extremos. O mercado de serviços ancilares é valorizado, refletindo a necessidade de flexibilidade para lidar com oscilações de oferta e demanda (PSR, 2025).

A tempestade de inverno de fevereiro de 2021 evidenciou de forma dramática essas vulnerabilidades. Cerca de 52 GW de capacidade ficaram indisponíveis por congelamento de turbinas eólicas, indisponibilidade de usinas a gás e até a parada de uma unidade nuclear, enquanto a demanda

disparava para mais de 70 GW. Mais de 4,5 milhões de residências ficaram sem energia e os preços atingiram o teto de US\$ 9.000/MWh, revelando os limites de um modelo baseado exclusivamente em sinais de preço (Mellerud, 2021; PSR, 2025).

Após o evento, o ERCOT e a Public Utility Commission of Texas (PUCT) reforçaram o papel da resposta da demanda (Demand Response – DR). A capacidade de Controllable Load Resources (CLRs) foi ampliada, novas categorias de consumidores incluindo grandes data centers e mineradores de Bitcoin, passaram a integrar os mercados de serviços ancilares, e os produtos de DR foram diversificados para incluir não apenas o Responsive Reserve Service (RRS), mas também Regulation Up/Down e Non-Spin Reserve (ERCOT, 2021). Exigências de telemetria, auditoria de disponibilidade e comprovação de flexibilidade foram incorporadas para garantir que os recursos realmente pudessem ser despachados em condições críticas.

Nesse contexto, o Texas consolidou-se como um hub global da mineração de Bitcoin, com carga estimada entre 2 e 4 GW até 2024 e pipeline acima de 5 GW (Carter et al., 2023). Mineradores participam em dois modelos principais:

- Mineração responsiva a preços, instalada junto a parques eólicos e solares (Behind-The-Meter – BTM), consumindo excedentes curtailed e criando um “piso de demanda” (Mellerud, 2021; Menati et al, 2022; Soluna, 2023).
- Programas de DR e serviços ancilares, como LRs no ERCOT, capazes de responder em segundos a sinais do operador.

Entre 2022 e 2024, mineradores chegaram a liberar mais de 1.000 MW de carga em momentos críticos, funcionando como “usinas virtuais negativas” ao reduzir consumo quase instantaneamente (Carter et al., 2023). Essa experiência provou que cargas digitais eletrointensivas, quando corretamente enquadradas, podem ser recursos confiáveis de flexibilidade.

Por outro lado, a rápida expansão de grandes operações também pressiona a infraestrutura de transmissão, podendo acentuar congestionamentos e volatilidade de preços (PSR, 2025). Esse duplo caráter, no caso, o risco de sobrecarga versus o recurso estratégico de estabilidade, reforça a visão de que o Texas é um laboratório vivo para integrar cargas flexíveis digitais aos sistemas renováveis (Mellerud, 2021; Menati et al, 2022).

As lições texanas são diretas para o Brasil. Embora o SIN opere sob despacho centralizado, o avanço do curtailment no Nordeste exige soluções semelhantes. A experiência do Texas mostra que institucionalizar a computação flexível como GET pode transformar excedentes renováveis em valor digital, aumentar a estabilidade da rede e ampliar a resiliência do sistema elétrico brasileiro.

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS E OPORTUNIDADES

### 5.1. Desafios e Fatores Limitantes

Apesar do grande potencial da mineração de Bitcoin como Tecnologia de Aprimoramento da Rede (GET), existem desafios e fatores limitantes que precisam ser considerados:

- **Volatilidade e necessidade de ferramentas de hedge:** O preço do Bitcoin é notoriamente volátil, o que afeta a previsibilidade dos fluxos de caixa dos mineradores. Além disso, a competição global pressiona o hashrate e reduz margens no longo prazo. Ferramentas financeiras como derivativos de dificuldade, derivativos de hashrate e tokens de hashrate estão emergindo, mas ainda não são amplamente adotadas (Butterfill, 2024).

- **Percepção pública negativa sobre o consumo de energia:** A mineração de Bitcoin é frequentemente criticada por seu elevado consumo energético, percebido como desperdício. Essa narrativa, contudo, ignora que uma parte crescente da mineração utiliza fontes renováveis estimadas entre 40% e 70%, contra cerca de 28% da média global. O debate entre ativistas climáticos e a indústria gera tensões políticas e riscos regulatórios, que podem dificultar a adoção de soluções mesmo quando tecnicamente vantajosas (CCAF, 2023; Bendiksen; Gibbons, 2023).
- **Custos de CAPEX e barreiras de entrada:** A implantação de operações de mineração exige investimentos significativos em ASICs e sistemas de refrigeração, especialmente em regiões de clima quente como o Nordeste brasileiro, onde a refrigeração por imersão se torna mais eficiente. O mercado de ASICs é concentrado, resultando em preços elevados e prazos longos de entrega, o que amplia as barreiras de entrada. Além disso, contratos de compra de energia (PPAs) frequentemente requerem garantias financeiras robustas, restringindo a participação de novos entrantes.
- **A necessidade de educação e conscientização do mercado:** Ainda existe um desafio em difundir, entre geradores e operadores de rede, o valor da computação flexível como off-taker de energia. A familiarização com esse novo modelo de negócio é essencial para que ele seja considerado dentro de estratégias de monetização de ativos energéticos (Menati et al, 2022).
- **Evolução da regulação:** Tal como observado em projetos-piloto nacionais de comércio descentralizado de energia com blockchain, a introdução de novas arquiteturas digitais tende a enfrentar barreiras regulatórias e resistência de agentes incumbentes. O mesmo é esperado na integração da mineração de Bitcoin como carga flexível, exigindo adaptações normativas para liberar todo o seu potencial sistêmico (CARDOSO et al., 2022).

## 5.2. Oportunidades e o Potencial para o Brasil

Apesar dos desafios, o Brasil tem uma oportunidade ímpar para liderar a integração da mineração de Bitcoin como GET:

- **Monetização de Ativos Ociosos e Energia Restrita (EVT, constrained-off):** A mineração de Bitcoin transforma o curtailment e os atrasos de conexão em fontes de receita. Isso inclui a monetização de "Energia Vertida Turbinável (EVT)" e da geração constrained-off, especialmente de fontes eólicas (Itau BBA, 2024).
- **Hedge Operacional:** A computação flexível atua como um hedge contra a dependência exclusiva da venda de eletricidade para a rede, garantindo a venda de MWh para um centro de dados on-site (Soluna, 2023).
- **Postergação de Investimentos em Transmissão:** Ao prover demanda flexível, a mineração de Bitcoin viabiliza a implantação de novos parques eólicos e solares em áreas remotas, reduzindo a pressão sobre a infraestrutura de transmissão e adiando investimentos de capital intensivo. Esse efeito pode mitigar riscos de projetos, acelerar a adição de capacidade renovável e ampliar a atratividade de investimentos no setor (K33 Research, 2022; PSR, 2025).
- **Posicionamento Estratégico do Brasil:** Com vastos recursos eólicos e outras fontes renováveis, e necessidades de otimização da rede, o Brasil pode se tornar um hub global para a mineração sustentável. A combinação única de abundância de renováveis e desafios de rede no Brasil pode gerar uma vantagem competitiva nacional, atraindo investimentos globais em infraestrutura digital sustentável.

A curva do pato no Brasil, que se aprofunda com o tempo, não é apenas um problema, mas um poderoso incentivo econômico para soluções como a mineração de Bitcoin. O crescente excedente de geração diurna (incluindo a eólica) e as rampas íngremes da noite criam sinais de mercado claros para

cargas flexíveis que podem absorver o excedente e reduzir a demanda durante os picos, impulsionando investimentos estratégicos. A mineração de Bitcoin pode absorver o excesso de geração eólica e solar durante o dia e reduzir a carga durante os picos de demanda noturnos. (Itau BBA, 2024)

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A análise apresentada demonstra que a mineração de Bitcoin reúne atributos técnicos fundamentais para ser reconhecida como uma Tecnologia de Aprimoramento da Rede (GET). Sua alta intensidade energética e escalabilidade permitem que mineradoras atuem como cargas flexíveis em grande escala, com operações frequentemente superiores a 100 MW, tornando-as relevantes para programas de resposta à demanda (Mellerud, 2021).

A capacidade de reação rápida, com ajuste de consumo em até 5 segundos por meio do desligamento de lotes de ASICs, equipara a mineração às usinas de pico mais responsivas, enquanto a granularidade do consumo viabiliza modulação precisa conforme as necessidades sistêmicas (Menati et al, 2023). Além disso, a alta disponibilidade e tolerância a interrupções eliminam riscos operacionais relevantes, diferentemente de outras cargas críticas, o que reduz o custo de reação a valores residuais, limitando-se ao custo de oportunidade de não minerar.

Outro fator estratégico é a flexibilidade geográfica, que permite instalar operações em regiões com abundância de geração renovável e restrições de transmissão, como o Nordeste brasileiro, consumindo localmente energia que, de outra forma, seria desperdiçada (PSR, 2025). Essa característica reforça o papel da mineração como mitigadora de curtailment, um problema crescente no Brasil, e contribui para a postergação de investimentos em transmissão.

Casos internacionais, como o ERCOT no Texas, evidenciam que mineradores já liberaram mais de 1.000 MW em momentos críticos, atuando como recurso de estabilidade em situações de estresse da rede (ERCOT, 2021). De forma semelhante, experiências em setores adjacentes mostram que a integração entre mineração e infraestrutura energética não apenas monetiza recursos ociosos, mas também reduz emissões quando associada ao aproveitamento de gás natural previamente queimado em flares (Bendiksen, Gibbons, 2023).

No Brasil, a adoção da mineração como GET exige uma mudança de paradigma: de um modelo historicamente centrado no despacho da oferta para um sistema em que a demanda responda dinamicamente às condições de rede. Esse reposicionamento alinha-se à transição energética em curso, que demanda soluções não apenas de expansão da geração, mas também de inteligência na gestão do consumo.

A convergência entre plataformas digitais descentralizadas e novas modalidades de carga flexível sugere um horizonte de inovação para o Brasil. Assim como o blockchain vem sendo estudado como ferramenta de compartilhamento de geração distribuída e compensação entre pares, a mineração de Bitcoin pode ocupar um papel complementar como off-taker flexível, monetizando excedentes e reforçando a resiliência da rede (CARDOSO et al., 2022);

### 6.1. Recomendações Futuras

- **Institucionalização regulatória:** Inserir data centers de mineração de Bitcoin no arcabouço de GETs reconhecidas pela ANEEL e pelo ONS, habilitando sua participação em mercados de capacidade e serviços ancilares.

- **Projetos-piloto no SIN:** Desenvolver projetos demonstrativos em regiões de alto curtailment e restrições de transmissão no Nordeste, com monitoramento independente para mensurar impactos técnicos e econômicos.
- **Integração com renováveis:** Incentivar modelos de autoprodução e parcerias com parques eólicos e solares, de forma a absorver excedentes energéticos e criar sinergias no financiamento de novos empreendimentos.
- **Aceitação pública e narrativa técnica:** Reforçar o enquadramento da mineração como infraestrutura energética estratégica, combatendo a percepção de “consumo improdutivo” por meio de dados de estabilidade, eficiência e mitigação de emissões.

Conclui-se que, quando corretamente estruturada, a mineração de Bitcoin pode transformar-se em uma ferramenta estratégica da transição energética brasileira, capaz de simultaneamente estabilizar o sistema, monetizar ativos renováveis subutilizados e posicionar o Brasil como referência global na integração entre energia e computação flexível.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENDIKSEN, C.; GIBBONS, S. How Bitcoin Mining is Helping Oil & Gas. CoinShares, 2023.

Disponível em: <<https://coinshares.com>>. Acesso em: 11 jul. 2025.

BUTTERFILL, J. CoinShares Mining Report: The Halving and its Impact on Hashrate and Miners' Cost Structures. CoinShares Research Blog, 2024.

CAMBRIDGE CENTRE FOR ALTERNATIVE FINANCE. Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). Cambridge University, 2023. Disponível em: <<https://ccaf.io/cbeci>>. Acesso em: 10 jul. 2025.

CARDOSO, B.B., LODETTI, P.Z., SIMÃO, M.S., MARTINS, M.A.I., ULHOA, L.G.O., RONCALIO, L.B., PINHEIRO, L.D.P.A., SANTOS, O.D.S., 2022, December. Business Model for Shared Energy Generation with Peer-To-Peer Trading via Blockchain. In 2022 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC) (pp. 1-5). IEEE.

CARTER, N.; et al. Leveraging Bitcoin Miners as Flexible Load Resources for Electric Grid Flexibility. SSRN, 2023. Disponível em: <[https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4634256](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4634256)>.

Acesso em: 12 jul. 2025.

ERCOT – ELECTRIC RELIABILITY COUNCIL OF TEXAS. Controllable Load Resource Participation in Ancillary Services Markets. ERCOT, 2021. Disponível em: <<https://www.ercot.com>>. Acesso em: 09 jul. 2025.

EVITE, P. M. Bitcoin Mining and Energy: A Comparative Analysis of Costs, Drivers, and Policy Implications. SSRN, 2024. Disponível em: <<https://ssrn.com/abstract=4650637>>. Acesso em: 18 jul. 2025.

ITAU BBA. Fading Sunshine and Silent Turbines: The Curtailment Conundrum. Flash News, 2024.

K33 RESEARCH. How Bitcoin Mining Improves the Economics of Renewable Energy. K33.com, 2022. Disponível em: <<https://k33.com/research/archive/articles/bitcoin-mining-improves-the-economics-of-renewable-energy>>. Acesso em: 11 jul. 2025.

MELLERUD, J. Bitcoin Mining as a Demand Response in an Electric Power System: A Case Study of the ERCOT-System in Texas. 2021. Dissertação (Mestrado) – Nord University, Bodø, 2021. Disponível em: <<https://nordopen.nord.no/nord-xmlui/bitstream/handle/11250/2836156/Mellerud.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2025.

MENATI, A.; LEE, K.; XIE, L. Modeling and Analysis of Utilizing Cryptocurrency Mining for Demand Flexibility in Electric Energy Systems: A Synthetic Texas Grid Case Study. IEEE Transactions on Energy Markets, Policy and Regulation, v. 1, n. 1, p. 1–10, 2023.

PSR ENERGIA. Energy Report PSR 02/2025. Rio de Janeiro: PSR Consultoria, 2025.

SOLUNA COMPUTING. Solving the World's Wasted Energy Problem. Soluna White Paper, 2023. Disponível em: <<https://www.solunacomputing.com>>. Acesso em: 13 jul. 2025.

TAKCI, M. T.; et al. Data Centres as a Source of Flexibility for Power Systems. Science of the Total Environment, 2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484725001623>>. Acesso em: 16 jul. 2025.

## **AUTORES**

### **(\*) Paulo Henrique Momm Paganelli**

Diretor de Tecnologia; Vextron Tecnologia Ltda.; paulo.paganelli@vextron.com.br

Engenheiro Mecânico (UFSC), com experiência em modelagem de sistemas térmicos, processos de fabricação e supply chain internacional. Gerenciou mais de 40 MW em datacenters de alta densidade, com operações no Brasil e Estados Unidos, onde conduziu a integração das operações com programas de resposta à demanda dos datacenters em Oklahoma e Ohio.

### **(\*\*) Luciano Benvenuti Roncalio**

Diretor de Operações; Vextron Tecnologia Ltda.; luciano.roncalio@vextron.com.br

Mestrado (UFSC), pós-graduação e certificações em desenvolvimento de inovações. Atuou como executivo em instituição de P&D, com foco em integração de software-hardware, sistemas embarcados e convergência digital.

## Green Hydrogen Plant Electrical Steady-State Model from Balance-of-Plant

Vinicius Lopes<sup>1</sup>, Mônica Saraiva Panik, Vinicius Sobral<sup>1</sup>, Marina Cezario<sup>1</sup>, Ricardo Galvão<sup>1</sup>,  
Anderson Lima<sup>1</sup>

1 Hitachi Energy

vinicius.lopes@hitachienergy.com, monica.saraivapanik@fmpanik.de,  
vinicius.sobral@hitachienergy.com, marina.cezario@hitachienergy.com,  
ricardo.galvao@hitachienergy.com, anderson.lima@hitachienergy.com

### RESUMO

O hidrogênio verde tem emergido como um dos mais promissores vetores no contexto da transição energética e da descarbonização. Embora a aplicação da tecnologia de eletrólise em larga escala seja bem consolidada e amplamente mencionada na literatura técnica, poucos esforços têm sido dedicados à análise de plantas de hidrogênio verde sob a perspectiva dos sistemas de energia. O trabalho propõe uma investigação das características do modelo de carga em regime permanente para plantas de hidrogênio verde em larga escala baseado em um levantamento de carga a partir da análise do balanço de massa e energia de plantas típicas. Os impactos das principais características das plantas sobre o levantamento de carga são igualmente discutidos.

### Palavras-chaves:

Hidrogênio Verde, Modelagem de Balanço de Massa e Energia, Estudos Elétricos, Conexão ao Sistema

### ABSTRACT

Green hydrogen has been emerging as one of most promising vectors in the energy transition and decarbonization landscape. Large-scale water electrolysis is a well-established technology and has been widely mentioned in recent technical literature. On the other hand, less effort has been devoted on investigating large-scale green hydrogen facilities throughout a power system's perspective. The work proposes an investigation on steady-state load model characteristics for large-scale green hydrogen plants based upon a load assessment from a typical balance-of-plant analysis. The impacts of the main characteristics of large-scale green hydrogen plants on load assessment are also addressed.

### Keywords:

Green Hydrogen; Balance-of-Plant Modeling; Electrical Studies; Grid Connection

## 1. INTRODOCTION

Green hydrogen has been emerging as one of the most promising technologies able to support both economy and heavy industry decarbonization within the energy transition landscape (Iain Staffell, 2019). Hydrogen has been usually classified based upon a color spectrum, according to raw material origin and to the production process adopted, as well as to the energy source employed and applicable decarbonization techniques (Energética, 2021). For instance, hydrogen is refereed to green as exclusively produced from water electrolysis supplied by renewable energy generation sources, especially wind and/or solar photovoltaic power (Energética, 2021).

Water electrolysis technology is well established and commercially available, being alkaline water electrolyzer (AWE) commercially available since the end of the 1930's (Santos, Sequeira e Figueiredo, 2013). Proton-Exchange Membrane (PEM) technologies have been first concept about the 1960's (Himabindu, 2019). The energy transition and economic driving forces have contributed to push the first pilot green hydrogen facilities and large-scale conceptual design to support different industrial sectors, from steel to fertilizer production, mobility, heating and energy storage applications (Iain Staffell, 2019) (S. G. Nnabuife, 2023). Also, the recent improvements experienced in power electronics have been propelling the large-scale alkaline electrolyzer' s commercial viability.

In recent technical literature, considerable efforts have been devoted on investigating promising improvements on industrial processes for hydrogen production (S. G. Nnabuife, 2023), economic aspects of large-scale green hydrogen production (KPMG, 2022) (A. M. V. Vives, 2023) and potential off-takers. On the other hand, less efforts have been dedicated to investigating the challenges behind the large-scale green hydrogen facilities' integration to utility grid (A. M. de Corato, 2023), especially considering grid requirements accomplishing and typical steady-state and dynamic load behavior. Consequently, a lack of coverage is found on addressing technical issues for power system studies for connecting large-scale green hydrogen plants to utility grid.

This gap is particularly evident when considering the distinct operational behaviors of different electrolyzer technologies, such as AWE and PEM systems, under steady-state conditions. Comparative studies as (Jingyi Wang, 2025) promote a comprehensive understanding of their unique electrical characteristics, including power consumption, current density-voltage curves and load range flexibility, aiming to provide experimental data foundation for advancing green hydrogen production and it integration to the grid.

The utility grid comprises widely complex and non-linear systems. Power systems reliability and supply stability are strong dependent of transmission system flexibility and power generation performance, which are even expected to contribute to supply feasibility and power system recovery capability after disturbances. Hence, Transmission System Operators (TSO) and regulatory agencies often define strict steady-state and transient performance requirements for grid-connected equipment also considering such technological particularities. For renewable asynchronous generation, fast response capability leads to special additional requirements for reactive current support during faults and minimum fault-through supportability, usually referred as fault ride-through capabilities. For conventional synchronous generation, beyond voltage and frequency regulation capabilities, minimal inertia constraints and power system stabilization capability may be required. For those facilities characterized as loads, minimum power factor requirements are imposed. Also, load models may be required for non-linear or controlled loads.

In Brazil, on connecting to utility grid, specific electrical studies are required during the integration process to ensure all grid performance requirements applicable have been properly accomplished. Technical analysis comprising the main impacts associated to the facilities' connection to the utility grid are also required. Additional analytics comprising usual operational routines are often carried out by Brazilian Grid Operator (ONS) during pre-operational stages, which may impose constraints for grid-connected operation of the accessing facilities according to the power system goals for security and operational reliability.

Conservative modelling approaches may lead to unfeasible analytics which also may point to unnecessary power transmission reinforcement advisements or poorly positioned ones, raising both power system

planning of expansion and operational costs. According to the current Brazilian grid regulation (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025), for loads that do not exhibit a well-defined dynamic behavior, it is recommended to model them as 50% constant power and 50% constant impedance for the active component, and 100% constant impedance for the reactive component. Furthermore, in the case of green hydrogen plants, it is essential to accurately model the converter dynamics, ensuring that the load representation is consistent with the type of converter employed, whether it is a diode rectifier, thyristor-based converter, or a voltage source converter (VSC) using IGBT technology.

In this sense, an accurate modelling approach for large-scale green hydrogen plants emerges as key factor on supporting power system analysis, as it provides the main guidance for planning the power system operation and may drive further directions for power system expansion and reinforcement planning.

The work deals with an investigation on steady state load modeling for large-scale green hydrogen plants. Model characteristics are discussed based upon the distribution of load shaped by typical industrial systems which comprises large-scale green hydrogen plants throughout a balance-of-plant analysis. Special attention is devoted to the key aspects which may affect the load distribution. Such remarks intent to introduce a simple approach on characterizing large-scale green hydrogen facilities from power system's steady-state perspective.

The second section presents the main assumptions for typical large-scale green hydrogen plants analyzed in this paper. The third section brings the main figures for its balance-of-plant and load assessment. The fourth section addresses the main assumptions for steady-state load model. Finally, last section summarizes the main conclusions and relevant issues for further research.

## 2. TYPICAL LARGE-SCALE GREEN HYDROGEN PLANT

Most hydrogen production products globally rely on water electrolyzers. Despite of many alternative technologies currently available, AWE and PEM electrolysis are still the most feasible ones for large-scale applications, due to technical maturity stage, higher capacity stack modules and large manufacturers supply capability (S. Shiva Kumar, 2022).

The AWE technology consists of two electrodes operating in a liquid alkaline electrolyte solution, typically potassium hydroxide (KOH) or sodium hydroxide (NaOH). These electrodes are separated by a diaphragm that isolates the produced gases and transports hydroxide ions ( $\text{OH}^-$ ) from one electrode to the other. When an electric current passes through the electrolyte, water molecules near the negative electrode (cathode) undergo reduction, producing hydrogen gas, while at the positive electrode (anode), the oxidation of hydroxyl ions generates oxygen gas (Lucía Paula Campo Schneider, 2024) (Tüysüz, 2024).

The PEM technology consists of water electrolysis in a cell equipped with a solid polymer electrolyte (SPE) that is responsible for proton conduction, separation of produced gases, and electrical isolation of the electrodes. In this process, deionized water flows to the anode, where it is oxidized into oxygen, protons, and electrons when a direct current voltage is applied. The protons ( $\text{H}^+$  ions) pass through the PEM to the cathode, where they meet electrons from the other side of the circuit and are reduced to hydrogen gas (Sezer, 2025) (Wang, 2025).

The Figure 1 presents a typical industrial process flow for large-scale green hydrogen plants powered by the utility grid for AWE or PEM electrolyzers. Green hydrogen plants based only on AWE electrolyzers require additional hydrogen compression stages for most of applications. Alternatively, hydrogen facilities based only on PEM usually require additional water electrodeionization treatment stage on loops for cooling circulation, to prevent contamination of process water due to PEM electrolysis acid media (M. Carmo, 2013) (Himabindu, 2019).

The efficiency of hydrogen water electrolysis is strongly dependent of the water conductivity, which points out the need for specific quality standards for water intake and treatment. Water intake quality standards are usually specified by electrolyzers manufacturers aiming rated efficiency and equipment lifecycle.

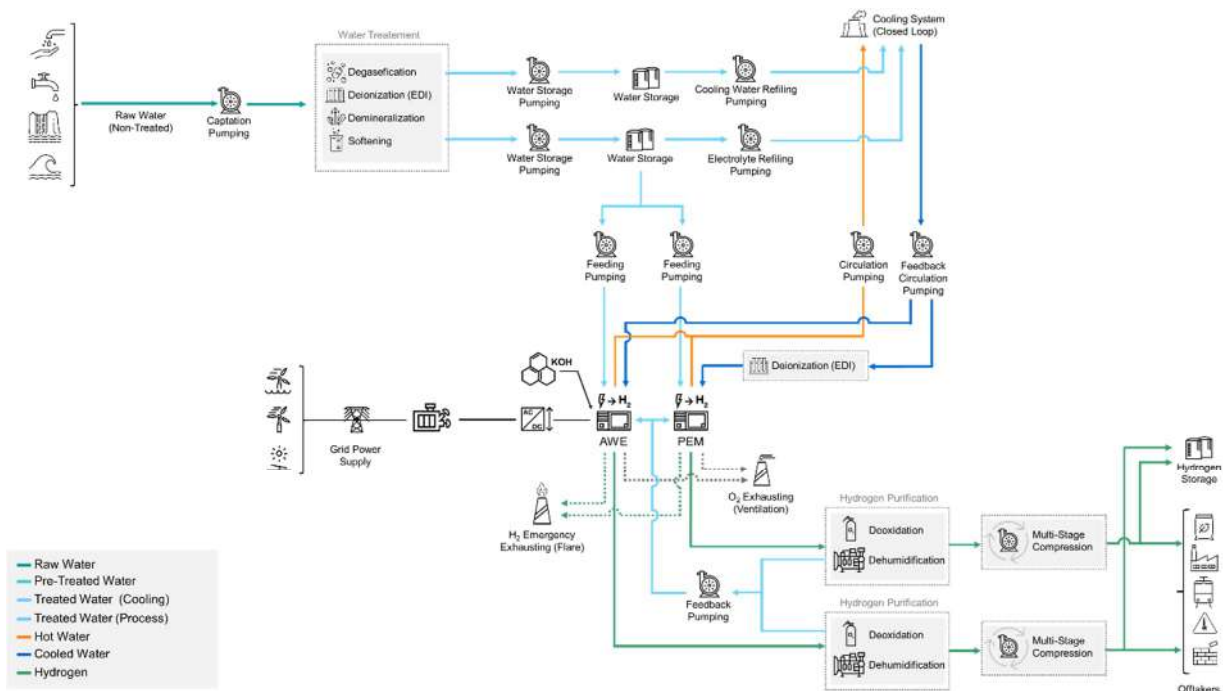


Figure 1 - Typical industrial process flow for large-scale green hydrogen facilities powered by the utility grid. Prepared by the authors.

However, water treatment specification is strongly sensitive as it must account the quality of the water, which is available to be supplied for the facility. For analysis purpose, typical water treatment stages are assumed to provide water for the electrolysis process within all required quality standards.

According to (Ferrando, 2023), AWE is recognized as the most mature and consolidated option. Their long-standing development and extensive industrial deployment have established AEW as a reliable and well-understood solution for green hydrogen production. In contrast, PEM are still evolving toward broader commercial viability, despite offering faster dynamic response, which means an advantage particularly relevant for grid frequency regulation. However, PEM exhibits higher degradation rates, as confirmed by both simulation and experimental data, which may limit their long-term reliability (Ferrando, 2023). The need for additional modeling techniques, such as ramp limiters and response linearization, further reflects the complexity of integrating PEM into stable power systems. Meanwhile, AWE benefits from a robust operational framework and proven performance, justifying their classification as the most established electrolysis technology currently available.

For green hydrogen plants, heat dispersion throughout electrolysis comprises the most significant energy losses. Hence, for large-scale facilities, heat management requires dedicated high capability industrial cooling systems. Cooling systems design shall fit to site conditions, as local air temperature and humidity may reduce its thermal management efficiency. Also, water availability and footprint constraints may impose additional limitations for cooling system design, leading to a strongly sensitive specification. For electrolysis, specifically, cooling systems design must prevent contamination of the water for electrolysis during cooling stage, which leads to a preferred closed-loop cooling. For analysis purpose, cooling is assumed to be addressed throughout cooling towers closed-loop systems.

Water pumping design is strongly dependent of on-site conditions, as height differences between water intake and storage, distance for water pumping, piping diameter and specific water characteristics, density and temperature. Since water pumping system design is beyond the purpose of this work, pumping system power consumption is assumed only dependent of the number of pumps required for the specified water flow rate, being pumping height and water characteristics disregarded.

Despite of high purity of the hydrogen produced, a hydrogen purification (gas/liquid separator) is required to take out water molecules and electrolyte residue. Hence, hydrogen purification, comprising degasification and deoxidation stages, is accounted.

Different hydrogen compression is required according to the application or off-takers. Compression systems lead to high power consumption of the utility services, as hydrogen low mass demands significative compression to reach high densities. The power consumption of hydrogen compression may be optimized throughout specific compression system design combining different types of compressors and phased operation to enhance overall efficiency. However, optimization techniques may be limited by operational requirements, equipment costs and system footprint constraints. Detailed design for compression system relays beyond the scope of this work.

Electric auxiliary systems to support power substation, administrative buildings, light, ventilation, fresh water and wastewater supply for industrial area, comprises additional utilities, which don't imply in significative impacts on the total expected load for a large-scale green hydrogen production plant. For simplicity, these systems are represented by a single load referred as ancillary services.

### 3. BALANCE-OF-PLANT AND LOAD ESTIMATION

For analysis, two different configurations for a typical 120 MW green hydrogen plants are proposed. The Table 1 summarizes the main figures from the balance-of-plant for green hydrogen plants for Configuration A and Configuration B, as the main characteristics of each plant.

Configuration A comprises a green hydrogen plant based upon PEM electrolyzers with 20% of daily production been reserved for storage as compressed gas at 400 bar. Raw water is assumed to be provided by external wastewater treatment system. For reference, for the remaining 80% of hydrogen produced, but not stored, the delivery pressure is assumed as 150 bar.

Configuration B comprises a green hydrogen plant based upon typical AWE electrolyzers, without hydrogen storage facilities. For reference, hydrogen delivery pressure is assumed as 150 bar. Raw water is assumed to be catch directly from sea, them being treated throughout a desalinization stage before delivered to the industrial process.

Table 1 - Main figures for balance-of-plant and assumptions for Configuration A and B for green hydrogen plants

	Configuration A	Configuration B
Electrolyzers Technology	PEM	AWE
Water Intake	Wastewater	Sea Water (Desalination)
Hydrogen Output Pressure	150 bar	150 bar
Storage Capacity	20% of Daily Production	None
Storage Pressure	400 bar	N/A
Hydrogen Electrolysis Capability	120 MW	120 MW
Hydrogen Production (For Offtakers)	1,876.00 kg/h	2,159.87 kg/h
Hydrogen Production (For Storage)	469.00 kg/h	-
Oxygen Production	18,611.64 kg/h	17,142.32 kg/h
Demineralized Water Consumption	23.45 m <sup>3</sup> /h	23.76 m <sup>3</sup> /h
Cooling Water Consumption	32.54 m <sup>3</sup> /h	54.29 m <sup>3</sup> /h

For both configurations, the produced hydrogen is assumed to be directly delivered to the respective off-takers, with power load associated with hydrogen piping being disregarded. Power load associated with wastewater treatment is also disregarded. Power loads associated with oxygen compression, purification and usage are both disregarded. For both configurations, electrolyzers are assumed to be powered by controlled rectifiers based upon IGBT technology.

For both configurations, power supply is assumed to be provided by the utility grid throughout an owned High-Voltage (HV) power substation. An internal Medium-Voltage (MV) power grid of is assumed for connecting electrical facilities to power substation. For each Configuration, 2 units of HV/MV 80 MVA power transformers are assumed for power substation.

For 34.5 kV internal grid, 16 MV typical feeders and 3 units of MV/LV 2 MVA power transformers are assumed to supply electrical facilities, for each Configuration, considering thermal limits based upon typical equipment. In addition to internal grid, for Configuration A, a set of 7 electrical power rectifiers are required for supply DC power to electrolyzers, while for Configuration B, 6 rectifiers are required.

The Table 2 presents the load assessment for green hydrogen plants from balance-of-plant analysis for Configuration A and B. The Figure 2Table 2 summarizes the distribution of the total load for each of those configurations considered for large-scale green hydrogen plant.

Table 2 - Load assessment for green hydrogen facilities for Configuration A and B

	Configuration A	Configuration B
Electrolysis	120,00 MW	120,00 MW
Hydrogen Purification	0,25 MW	0,25 MW
Hydrogen Compression	2,04 MW	0,16 MW
Pumping System	0,05 MW	0,11 MW
Cooling System	0,62 MW	0,82 MW
Water Treatment	1,07 MW	1,04 MW
Water Pumping for Catching	0,05 MW	0,05 MW
Ancillary Services	2,00 MW	2,00 MW
Total Electrical Losses	3,33 MW	3,27 MW
Total Load (Without Losses)	126,09 MW	124,42 MW
Total Load (With Losses)	129,41 MW	127,69 MW

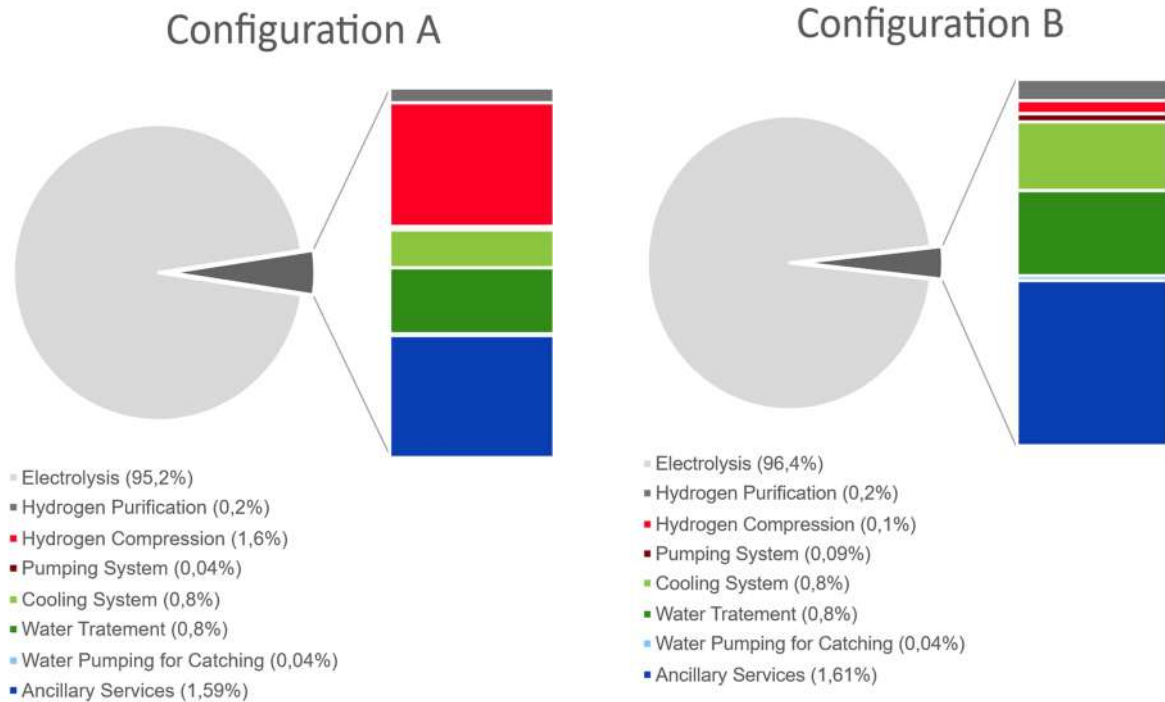


Figure 2- Loads distribution for Configurations A and B for large-scale green hydrogen plant. Prepared by the authors.

The electrical losses refer to total of ohmic losses regards power rectifiers losses, MV internal power grid comprising losses in cabling, power transformers and rectifiers, and HV/MV power transformers losses. For calculations of losses in rectifiers feeding DC power to electrolyzers, an efficiency of 98% is assumed. For electrical cabling losses, a resistance of 0,407% in bases 100 MVA and 34,5 kV is assumed for electrical losses calculations. For MV/LV power transformers losses, total losses per unit are assumed as 0,61% of its rated power. For HV/MV power transformers losses, total losses per unit are assumed as 0,5% of its rated power.

#### 4. ELECTRICAL STEADY-STATE MODEL

The Table 2 also summarizes the load estimation for each of those industrial systems which comprises a typical large-scale green hydrogen plant, for each Configuration. For a reasonable approximation, the overall electrical characteristic of each of such industrial systems can be inferred from the electrical characteristic of the main load which comprises it, such as induction motors or resistive components. From this assumption, the load assessment in Table 2 can be re-aggregate in five main categories, such as electrolysis, balance-of-plant systems, pumps and compressors, ancillary services and electrical losses. The Table 3 summarizes the main aggregated loads from system’s electrical characteristics overall in MW and in percentage of total load for each configuration, including its respective electrical losses.

Table 3 – Aggregated loads for green hydrogen facilities for Configuration A and B

	<b>Configuration A</b>	<b>Configuration B</b>
Electrolysis	120.00 MW (92.7%)	120.00 MW (94.0%)
Balance-of-Plant Systems	1.32 MW (1.0%)	1.29 MW (1.0%)
Pumps and Compressors	2.77 MW (2.1%)	1.13 MW (0.9%)
Ancillary Services	2.00 MW (1.5%)	2.00 MW (1.6%)
Electrical Loads	3.33 MW (2.6%)	3.27 MW (2.6%)

Despite of different assumptions for Configuration A and B, for both, electrolysis loads comprise more than 90% of total load of hydrogen industrial facility. Also, total load accounting ancillary services, pumps and compressors and other balance-of-plant systems comprises less than 5% of total load, while electrical losses are less than 3%. Hence, electrolyzers play a key role in large-scale green hydrogen plants load profile. A feasible approximation leads to constraint the load modelling problem to electrolyzers model.

For both AWE and PEM electrolyzers, a reasonable assumption for steady-state analysis leads to neglect any variation in electrolysis energetic efficiency (A. M. de Corato, 2023). From considering a suitable control strategy for electrolyzers’ rectifiers switching (A. M. de Corato, 2023), thus neglecting any impacts of rectifier dynamics on electrolysis energetic efficiency, for steady-state, electrolysis can be represented as constant power load (A. M. de Corato, 2023).

Also, large-scale green hydrogen power plants are intended to operate continuously, with maintenance cycles being held sparsely leading to 98% of yearly availability (Christiansen, 1982). For hydrogen facilities powered by the utility grid, from considering no oscillations on power supply and hydrogen storage capability largely enough to accommodate any fluctuations on off-takers demand, process flows can be assumed continuous with few load variations in an hourly scale. From this, the loads associated to balance-of-plant systems and compression systems can also be represented as constant power.

These assumptions push to about 95% of a typical large-scale green hydrogen plant load be represented as constant power, what ensures a suitable representation for most of electrical power grid analysis.

Water pumping systems can be hardly impacted by water storage, water intake and treatment system design capabilities. On feeding electrolysis and refilling cooling systems losses, water flow must be continuous. Hence, large water storage reduces expected working hours for water intake pumping and water treatment systems. However, water pumping for catching and water treatment comprises less than

1% of total load of a large-scale green hydrogen facilities, what turns to neglect water system intermittency a reasonable approximation.

Electrical losses are strongly dependent of both voltage level of internal grid and physical distance between power feeding busbar and industrial facilities. The Internal electrical losses can be mitigated throughout a cautious industrial layout design accounting for industrial equipment placement, notably electrolyzers warehouse, which due to its share on overall power consumption, shall be as close as possible of feeding point. Despite of both typical configurations investigated have a small share of electrical losses, about 2,6%, for real large-scale green hydrogen plants, considering the optimization benchmarks have been fully addressed, it is reasonable to account electrical losses shares of even less than 1%.

## 5. FINAL REMARKS

The work deals with the steady-state modeling problem for large-scale green hydrogen plants. Two typical configurations for such industrial plants are proposed and investigated. The main figures of balance-of-plant and load assessment for each configuration are presented. Steady-state model assumptions are proposed based upon the share of the total load for different industrial systems and the operational aspects of typical large-scale green hydrogen plants connected to the utility grid.

From load assessment summarized in Table 2, the balance-of-plant, pumping and compression systems loads can be hardly impacted as industrial plant configuration. Notably, these loads are hardly affected by the water intake choice, which pushes the water pumping flow and water treatment requirements, and the intended application for the hydrogen produced, which may claim for special compression requirements.

Despite of this, for both cases, electrolysis holds a share of more than 92% of overall load. From considering the operational aspects concerning the large-scale green hydrogen plants and the expected optimizations on facilities' projects, a reasonable assumption points constant power be a reasonably assumption suitable for steady-state analysis. However, this assumption is limited to large-scale green hydrogen plants based upon controlled-switching rectifiers for powering electrolyzers, as it allows to decouple hydrogen production from grid dynamics, thus neglecting the impacts of external voltage fluctuations on electrolysis performance.

As further research, promising topics relay on improving load assessment methodology for large-scale green hydrogen facilities, investigations on the influence of uncontrolled power rectifiers and the impacts of the control strategies adopted for controlled power rectifiers over steady-state ZIP load model parameters.

## 6. ACKNOWLEDGES

The authors thanks to Hitachi Energy Brasil for the technical and financial support during the development of such research.

## REFERENCES

- A. M. DE CORATO, M. G. D. S. R. P. M. Hydrogen Electrolyzer Load Modelling for Steady-State Power Studies. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023.
- A. M. V. VIVES, R. W. S. R. A. A. S. Techno-Economic Analysis of Large-Scale Green Hydrogen Production and Storage. Applied Energy, 19 mAY 2023.
- CHRISTIANSEN, T. G. A. K. Hydrogen by Water Electrolysis as Basis for Small Scale Ammonia Production. A comparison with Hydrocarbon Based Technologies. International Journal of Hydrogen Energy, 1982.
- ENERGÉTICA, E. D. P. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. Empresa de Pesquisa Energética. [S.I.]. 2021.

FERRANDO, J. V. Modelling and Simulation of Hydrogen Electrolyzers for Power System Applications, 2023.

HIMABINDU, S. K. A. V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. Materials Science for Energy Technologies, Dezembro 2019.

IAIN STAFFELL, D. S. A. V. A. P. B. P. E. D. P. E. N. S. A. K. R. W. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. Energy & Environmental Science, v. 12, p. 463-491, 2019.

JINGYI WANG, J. Y. Y. F. J. H. Z. C. M. L. J. Z. J. Q. Comparative experimental study of alkaline and proton exchange membrane water electrolysis for green hydrogen production. Applied Energy, v. 379, p. 124936, 2025.

KPMG. How to Evaluate the Cost of Green Hydrogen Business Case? Assessing Green Hydrogen Production Costs. [S.l.]. 2022.

LUCÍA PAULA CAMPO SCHNEIDER, M. D. D. U. F. E. H. J. W. K. G. N. K. D. G. F. R. S. A. A. Advancements in hydrogen production using alkaline electrolysis systems: A short review on experimental and simulation studies. Current Opinion in Electrochemistry, Outubro 2024.

M. CARMO, D. L. F. J. M. A. D. S. A Comprehensive Review on PEM Water Electrolysis. International Journal of Hydrogen Energy, 38, 2013. 4901-4934.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 2.3 - Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos. [S.l.]: ONS, 2025.

S. G. NNABUIFE, C. K. D. P. C. O. B. K. X. S. A. K. J. A Comparative Analysis of Different Hydrogen Production Methods and Their Environmental Impact. Clean Technologies, 2023.

S. SHIVA KUMAR, H. L. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production. Energy Reports, v. 8, p. 13793-13813, 2022.

SANTOS, D. M. F.; SEQUEIRA, C. A. C.; FIGUEIREDO, J. L. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. Química Nova, v. 36, p. 1176-1193, 2013.

SEZER, N. A. B. S. A. F. U. A. S. A. A comprehensive review of the state-of-the-art of proton exchange membrane water electrolysis. Materials Science for Energy Technologies, Janeiro 2025.

TÜYSÜZ, H. Alkaline Water Electrolysis for Green Hydrogen Production. Accounts of Chemical Research, Fevereiro 2024.

WANG, C. R. A. S. J. M. A. M. R. A. C. H.-M. J. A. K. D. A. P. A. M. A. P. A. B. A. F. N. M. A. L. C. P. A. L. J. T. A. L. J. Proton Exchange Membrane (PEM) Water Electrolysis: Cell-Level Considerations for Gigawatt-Scale Deployment. Chemical Reviews, Fevereiro 2025.

## **DESCARBONIZAÇÃO DAS REDES DE BAIXA TENSÃO PARA PARQUES EÓLICOS: O PAPEL DO CABO VOLTENAX ECO GRID**

**Carla Cruz, Carlos Koda, Guilherme Toledo, Kleber Caliani, Marcondes Takeda e Tiago  
Cirezola**

Prysmian Group

carla.cruz@prysmian.com, carlos.koda@prysmian.com, guilherme.toledo@prysmian.com,  
kleber.caliani@prysmian.com, marcondes.takeda@prysmian.com, tiago.cirezola@prysmian.com

### **RESUMO**

Este trabalho descreve o desenvolvimento do cabo Voltenax ECO GRID, uma solução técnica voltada às redes internas de distribuição de baixa tensão em parques geradores de energia renováveis. O foco está na redução das emissões do tipo Escopo 3 associadas ao ciclo de vida dos materiais, por meio da utilização do biopolietileno (PE verde), obtido a partir do etanol da cana-de-açúcar. Os ensaios físicos, mecânicos e elétricos demonstraram conformidade com os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 7287 e ABNT NBR 6251, validando a viabilidade técnica da solução. O cabo foi posteriormente homologado e incorporado ao portfólio comercial da Prysmian. O artigo também apresenta reflexões sobre os desafios enfrentados na formulação e prototipagem, bem como o impacto ambiental da substituição de materiais de origem fóssil por alternativas renováveis e circulares.

### **Palavras-chaves:**

descarbonização; biopolietileno; pegada de carbono; ciclo de vida; parques eólicos.

### **ABSTRACT**

This paper describes the development of the Voltenax ECO GRID cable, a technical solution for internal low-voltage distribution networks in renewable energy generating parks. The focus is on reducing Scope 3 emissions associated with the materials' life cycle, using bio-based polyethylene (green PE) derived from sugarcane ethanol. Physical, mechanical, and electrical tests demonstrated compliance with the criteria established by ABNT NBR 7287 and ABNT NBR 6251, validating the technical feasibility of the solution. The cable was subsequently approved and incorporated into Prysmian's commercial portfolio. The article also presents reflections on the challenges encountered during formulation and prototyping, as well as the environmental impact of replacing fossil-based materials with renewable alternatives.

**Keywords:**

decarbonization; bio-based polyethylene; carbon footprint; life cycle; wind farms.

**1. INTRODUÇÃO**

A busca por soluções sustentáveis nas cadeias de infraestrutura elétrica tem avançado substancialmente, impulsionada pela necessidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa em todos os elos produtivos. Enquanto os avanços na geração de energia renovável — especialmente eólica — são bem reconhecidos, menos atenção é dada às emissões indiretas associadas aos materiais e componentes utilizados nessa mesma infraestrutura. Estas emissões, classificadas como Escopo 3, incluem impactos provenientes da extração e transformação de matérias-primas, transporte, manufatura e descarte de produtos ao longo de seu ciclo de vida (Benavides et al., 2020).

Nas redes internas de distribuição em baixa tensão (LV) de parques eólicos, os cabos elétricos desempenham papel crucial no escoamento da energia gerada. Tradicionalmente, esses produtos são fabricados com polímeros de origem fóssil, que apresentam elevada pegada de carbono e baixa circularidade. Essa realidade impõe desafios à descarbonização completa do sistema elétrico, mesmo em contextos de geração limpa.

Este artigo apresenta o desenvolvimento do Voltenax ECO GRID, um cabo elétrico de baixa tensão projetado para reduzir emissões de Escopo 3. Utilizando o biopolietileno (PE verde), a solução proporciona desempenho técnico equivalente aos modelos convencionais, com significativa redução de impacto ambiental. O trabalho também incorpora conceitos de ciclo de vida, economia circular e inovação de materiais aplicados à engenharia elétrica (Bertoluci et al., 2014).

**2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

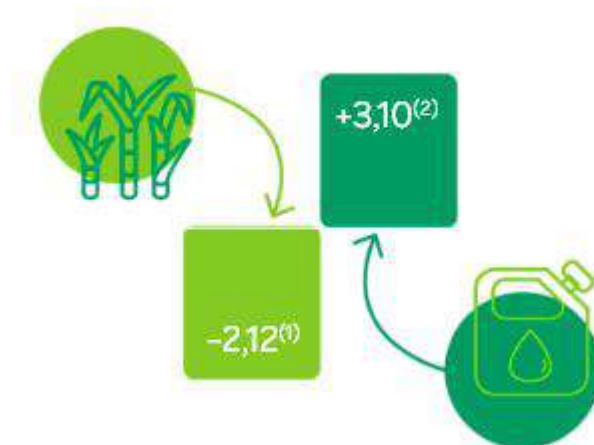
O desenvolvimento do cabo Voltenax ECO GRID está diretamente relacionado à busca por soluções sustentáveis para o setor de energia renovável, especialmente em aplicações em parques eólicos. A escolha do biopolietileno como componente da isolamento elétrica representa um avanço significativo na substituição de materiais convencionais por alternativas de menor impacto ambiental.

Esse biopolímero, derivado de fontes renováveis, foi submetido a rigorosos testes de processabilidade, resistência térmica e estabilidade elétrica, com o objetivo de atender aos requisitos das normas técnicas vigentes e às exigências específicas de instalação em ambientes de alta complexidade, como os encontrados em sistemas de geração e distribuição de energia eólica. A formulação do material foi otimizada para garantir desempenho confiável, durabilidade e compatibilidade com os desafios operacionais desses parques.

## 2.1 Biopolietileno: Origem, Ciclo de Vida e Benefícios

O biopolietileno (PE verde) é um polímero termoplástico produzido a partir do etanol da cana-de-açúcar, sendo uma alternativa renovável ao polietileno convencional derivado de petróleo. Seu principal diferencial está no perfil de emissões ao longo do ciclo de vida. Enquanto o PE de origem fóssil emite, em média, 2,1 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de polímero produzido, o PE verde apresenta um balanço negativo, capturando aproximadamente 3,1 toneladas de CO<sub>2</sub> durante sua produção agrícola e industrial. Essa diferença representa até 5 toneladas de CO<sub>2</sub> evitadas por tonelada de material (Siracusa & Blanco, 2020), o que o torna um exemplo emblemático de como soluções baseadas em biomassa podem contribuir para a mitigação das mudanças climáticas. A Figura 1 sintetiza esse diferencial, evidenciando a redução líquida de carbono decorrente da substituição de polímeros fósseis pelo biopolietileno.

*Figura 1 - Redução líquida de carbono associada ao uso de biopolietileno em comparação ao polietileno de origem fóssil.*



*Fonte: Braskem (2025a)*

Além do balanço de emissões, o biopolietileno destaca-se por seu ciclo de vida circular, que se inicia no cultivo da cana-de-açúcar, uma das culturas de maior produtividade energética do mundo. Durante a fase agrícola, o cultivo absorve CO<sub>2</sub> da atmosfera, contribuindo para o sequestro de carbono. Posteriormente, a biomassa é convertida em etanol, que serve como matéria-prima para a produção de eteno e, finalmente, do polietileno verde. Esse material pode ser extrusado e aplicado em produtos industriais de alto desempenho, como cabos de energia, sem perda de propriedades técnicas em relação ao PE convencional. Ao final de sua vida útil, o biopolietileno mantém potencial de reciclagem mecânica ou de aproveitamento energético controlado, reforçando sua circularidade e reduzindo impactos adicionais (Khoo et al., 2010). A Figura 2 ilustra esse ciclo completo, evidenciando como cada

etapa — do plantio ao descarte — contribui para a redução da pegada de carbono e para a sustentabilidade do produto

*Figura 2 - Ciclo de vida Biopolietileno: do cultivo da cana-de-açúcar até o reaproveitamento ao final da vida útil.*



*Fonte: Braskem (2025b)*

Do ponto de vista técnico, o PE verde apresenta equivalência funcional ao PE de origem fóssil em propriedades elétricas, mecânicas e térmicas. Isso permite sua aplicação direta em sistemas elétricos de missão crítica, como cabos de distribuição subterrânea para parques eólicos. A adoção do biopolietileno contribui diretamente para a redução das emissões de Escopo 3 associadas à fabricação desses cabos, ao mesmo tempo em que apoia metas de neutralidade de carbono por parte dos fabricantes e operadores do setor elétrico.

## 2.2 Aplicação do cabo em parques geradores de energia renovável

Em parques geradores de energias renováveis, como os parques eólicos, as redes subterrâneas de baixa tensão desempenham um papel essencial ao transportar a energia elétrica gerada pelos aerogeradores até os transformadores elevadores ou painéis de média tensão. Essa infraestrutura é particularmente crítica em parques instalados em regiões remotas, muitas vezes distantes dos grandes centros urbanos e expostas a condições ambientais severas. A Figura 3 apresenta um exemplo desse cenário: um parque eólico localizado em área isolada, onde a robustez e a confiabilidade da rede subterrânea são determinantes para a continuidade do fornecimento de energia.

Figura 5 - Parques eólicos.



Fonte: Prysmian(2025a)

Nesses contextos, os cabos de baixa tensão são continuamente expostos a ambientes agressivos, marcados por variações térmicas acentuadas, alta umidade do solo, esforços mecânicos devido ao enterramento e riscos potenciais de ataque químico. A aplicação do Voltenax ECO GRID foi concebida justamente para responder a esses desafios. Seu projeto privilegia propriedades como elevada resistência à abrasão, estabilidade dielétrica em longo prazo e durabilidade mecânica, assegurando a confiabilidade da rede mesmo sob condições adversas de operação.

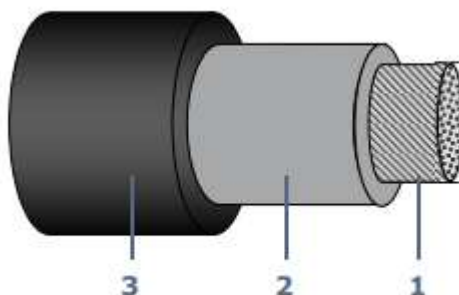
Além disso, a composição baseada em biopolietileno (PE verde) reforça não apenas a robustez técnica, mas também a sustentabilidade da solução. Ao substituir parcialmente polímeros de origem fóssil, o cabo contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa associadas ao Escopo 3, garantindo que a infraestrutura elétrica esteja alinhada às metas globais de descarbonização e aos compromissos ESG assumidos pelo setor energético. Essa combinação de desempenho técnico e benefício ambiental torna o Voltenax ECO GRID uma alternativa estratégica para projetos eólicos modernos, especialmente em locais remotos, onde a confiabilidade e a sustentabilidade são igualmente críticas.

### 3. MÉTODO DO ESTUDO

O desenvolvimento do cabo Voltenax ECO GRID teve início com a definição dos objetivos ambientais e técnicos do projeto, tendo como premissa a redução das emissões de Escopo 3 associadas à fabricação de cabos de baixa tensão. A equipe de engenharia da Prysmian partiu da seleção criteriosa de materiais sustentáveis, e estabeleceu como meta a substituição parcial de matérias-primas de origem fóssil por alternativas sustentáveis — como o biopolietileno — no isolamento, mantendo as especificações de desempenho elétrico e mecânico conforme as normas técnicas vigentes.

Para isso, foram avaliadas propriedades físico-químicas dos compostos, como estabilidade térmica, compatibilidade com o cobre, processabilidade e resistência mecânica. Também foram realizados testes de extrusão em bancada e análises de interface entre os componentes, visando assegurar a integridade estrutural do cabo final. O processo de desenvolvimento envolveu a colaboração entre os times de P&D, produção, qualidade e suprimentos, com foco na viabilidade técnica e econômica da solução. A seleção final foi testada quanto à processabilidade, resistência térmica e estabilidade elétrica, alcançando a conformidade com os padrões da NBR 7287 e 6251 e representando um equilíbrio entre inovação ambiental e robustez técnica.

*Figura 3 - Cabo Voltenax.*



*Fonte: Prysmian (2025b)*

Após a validação dos materiais em escala laboratorial, foram produzidos protótipos industriais do cabo Voltenax ECO GRID para avaliação em linha de produção. O processo foi realizado em extrusoras industriais convencionais, com adaptação de perfil térmico e ajuste de ferramental para acomodar as características dos novos compostos.

A extrusão da isolação com biopolietileno exigiu atenção à uniformidade da aplicação e ao controle de espessura. O resultado foi um cabo com superfície lisa, bom acabamento e aderência entre as camadas. A prototipagem também serviu de base para estimativas de emissões evitadas e validação do processo produtivo, demonstrando que a adoção dos materiais sustentáveis não compromete a produtividade ou a qualidade do cabo final.

#### **4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Após a fase de prototipagem, o cabo Voltenax ECO GRID foi submetido a um conjunto abrangente de ensaios de rotina, tipo e especiais, em conformidade com as normas NBR 7287 e NBR 6251. Os testes englobaram resistência elétrica, tensão aplicada, resistência da isolação, tração e alongamento, hot set, retração, absorção de água e envelhecimento acelerado, assegurando a validação completa do desempenho elétrico, mecânico e ambiental do produto.

No caso específico dos ensaios mecânicos, o isolamento foi avaliado em três condições distintas: amostras originais, após envelhecimento artificial e após envelhecimento em cabo completo. Em todas as situações, os resultados foram altamente positivos, apresentando valores de resistência à tração e alongamento significativamente superiores aos limites mínimos exigidos pelas normas. Essa consistência confirma a estabilidade dimensional e a robustez do material mesmo após exposição prolongada a esforços térmicos e mecânicos.

Os dados consolidados desses ensaios podem ser observados na Figura 4, que demonstra o desempenho superior do isolamento frente às exigências normativas, reforçando a confiabilidade técnica da solução.

Figura 4 - Resultados testes Voltenax conforme normas construtivas.

<p><b>Prysmian analysis and description:</b> 10049164 - VOLTENAX/PE ECO GRID 400mm<sup>2</sup> 1kV AL</p> <p><b>OP, batch or NF number:</b> OP 53603</p> <p><b>Product standard:</b> NBR 7287</p> <p><b>Test methodology standard:</b> NM IEC 60811-1-1</p> <p><b>Equipments:</b> Máquina de tração universal (MM – 0004, MD-0025, MV-0003)</p>
---

<p><b>Sample tested:</b> Insulation XLPE</p>
--

Characteristic	Unit	Samples					Results	Specified	
		1	2	3	4	5			
Original	Tensile strength	MPa	17,12	18,79	15,94	16,13	17,34	17,12 ± 0,61	min. 12,5
	Elongation at break	%	513,9	525,4	509,9	497,5	550,7	513,9 ± 19,8	min. 200
After ageing 135°C 168h	Tensile strength	MPa	21,2	20,5	20,2	21,7	21,8	21,17 ± 0,61	
	Tensile strength Variation	%						23,66	max. 25
	Elongation at break	%	580,2	593,8	572,1	615,3	583,2	583,2 ± 16,1	
	Elongation Variation	%						13,48	max. 25
After ageing 100°C 168h with conductor	Tensile strength	MPa	18,9	16,9	17,4	16,9	19,0	17,38 ± 0,81	
	Tensile strength Variation	%						1,52	max. 40
	Elongation at break	%	597,2	519,5	566,7	503,0	572,4	566,7 ± 28,5	
	Elongation Variation	%						10,27	max.40

Fonte: Os autores.

De forma geral, os ensaios comprovaram que o Voltenax ECO GRID alia sustentabilidade e desempenho, mantendo propriedades técnicas consistentes em todas as etapas avaliadas. Assim, a solução se apresenta como tecnicamente viável e ambientalmente diferenciada, apta a operar com segurança e confiabilidade em redes subterrâneas de baixa tensão em parques eólicos modernos.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento do cabo Voltenax ECO GRID representa um avanço concreto na integração de materiais sustentáveis à infraestrutura elétrica de parques geradores de energias renováveis. A utilização de biopolietileno comprova ser tecnicamente viável, mantendo o desempenho necessário para redes de baixa tensão, ao mesmo tempo em que reduz significativamente as emissões associadas ao Escopo 3 — aquelas que ocorrem ao longo da cadeia de suprimentos.

Ao substituir matérias-primas fósseis por alternativas renováveis, este projeto reforça a importância da inovação de materiais no processo de descarbonização do setor elétrico. O trabalho também demonstra que a aplicação de conceitos de ciclo de vida e economia circular pode ser realizada de forma prática, com resultados mensuráveis em termos ambientais e operacionais.

A experiência adquirida com a prototipagem e validação do cabo Voltenax ECO GRID abre perspectivas para a expansão do uso de materiais sustentáveis em outras linhas de produto e segmentos da cadeia energética. Assim, o estudo contribui de forma relevante para os esforços globais de redução de emissões e para a construção de sistemas elétricos mais resilientes e sustentáveis.

## REFERÊNCIAS

- BENAVIDES, P. T.; SUN, P.; HAN, J.; DUNN, J. B.; WANG, M. Q. Life-cycle analysis of fuels and chemicals from renewable and fossil feedstocks. *Green Chemistry*, v. 22, n. 19, p. 6208–6221, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0GC01894C>
- BERTOLUCI, G.; COELHO, S. T.; CAVALIERO, C. K. N. Life Cycle Assessment of polyethylene made from sugarcane ethanol. *Journal of Cleaner Production*, v. 65, p. 488–496, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.020>
- BRASKEM. Catálogo PE Verde. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/imgreen>. Acesso em: 2 jul. 2025. (2025a)
- BRASKEM. My environmental impact. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/imgreen/my-environmental-impact>. Acesso em: 16 jun. 2025. (2025b)
- BRASKEM. Catálogo PE Verde. Disponível em: [https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/Download/Upload/Catalogo\\_PE\\_Verde.pdf](https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/Download/Upload/Catalogo_PE_Verde.pdf). Acesso em: 20 jun. 2025.
- KHOO, H. H.; TAN, R. B. H.; CHNG, K. W. L. Environmental impacts of conventional plastic and bio-based carrier bags. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 15, n. 3, p. 284–293, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0161-9>
- PRYSMIAN. Voltenax Grid 1kV – Ficha técnica. Disponível em: [https://br.prysmian.com/sites/default/files/atoms/files/SO\\_003\\_01\\_PT\\_Voltenax%20Grid%201kV.pdf](https://br.prysmian.com/sites/default/files/atoms/files/SO_003_01_PT_Voltenax%20Grid%201kV.pdf). Acesso em: 20 jun. 2025. (2025a)
- PRYSMIAN. Energia limpa. Disponível em: <https://latam.prysmian.com/pt-br/news/energia-limpa>. Acesso em: 10 jul. 2025. (2025b)
- SIRACUSA, V.; BLANCO, I. Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-PET: Recent Developments in Bio-Based Polymers Analogous to Petroleum-Derived Ones. *Polymers*, v. 12, n. 8, p. 1641, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12081641>

## **Análise Preditiva na Eólica: Estratégias de Priorização para Manutenção Inteligente**

**Tiago Raimundo Chiaradia<sup>1</sup>, Fábio Augusto de Oliveira Soares<sup>1</sup> e Leticia Cristina Teixeira Bassani<sup>1</sup>**

1 CPFL Renováveis, Brasil

tiago.chiaradia@cpfl.com.br fabio.soares@cpfl.com.br bassani.leticia@cpfl.com.br

### **RESUMO**

Diante do cenário atual da geração de energia eólica, a utilização de análise preditiva para detectar falhas em aerogeradores tornou-se essencial para assegurar a confiabilidade e disponibilidade dos ativos. No Centro de Monitoramento de Ativos (CMA), são continuamente coletados dados operacionais de componentes críticos, como rolamento principal (*main bearing*), gerador e caixa de engrenagens (*gearbox*), e, com o objetivo de antecipar a necessidade de intervenção por parte das equipes de Operação e Manutenção (O&M), foram desenvolvidos e treinados modelos de *machine learning* específicos para cada tipo de ativo, permitindo uma manutenção orientada por condição. No entanto, o grande volume de informações provenientes de milhares de componentes impõe a necessidade de um sistema automatizado de análise e priorização eficiente. Anteriormente, a priorização das manutenções era realizada manualmente, com cada ativo sendo analisado de forma individual, o que demandava tempo e recursos significativos e dificultava a identificação ágil de componentes críticos. A adoção de uma metodologia automatizada trouxe padronização ao processo, com a geração diária de alertas, chamados gatilhos, que orientam a abertura de anomalias no sistema de engenharia da manutenção, permitindo que a manutenção preditiva se baseie em dados e indicadores objetivos, substituindo a análise empírica e subjetiva dos operadores por decisões mais precisas e consistentes, contribuindo para a redução do tempo de resposta da O&M, otimizando o direcionamento das ações para os ativos mais críticos. A integração de algoritmos de *machine learning* com ferramentas de priorização automatizadas tem se mostrado uma solução eficaz para melhorar a alocação de recursos e elevar a confiabilidade da operação eólica, viabilizando a gestão de milhares de modelos customizados, ajustados às particularidades de cada aerogerador e seus componentes, e, como desdobramento, está em curso a ampliação dessa metodologia para as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), estendendo os ganhos da análise preditiva a outras fontes de energia renovável, sustentada pela experiência acumulada no CMA, que agora assume um papel estratégico no apoio à gestão inteligente de ativos em novas matrizes energéticas.

**Palavras-chaves:** Manutenção preditiva, Priorização automatizada e Energia eólica

## ABSTRACT

In the current context of wind power generation, the use of predictive analytics for fault detection in wind turbines has become essential to ensure asset reliability and availability. At the Asset Monitoring Center (CMA), operational data from critical components, such as the main bearing, generator, and gearbox, are continuously collected, and to anticipate the need for intervention by the Operations and Maintenance (O&M) teams, machine learning models specific to each asset type have been developed and trained, enabling condition based maintenance. However, the large volume of information coming from thousands of components imposes the need for an efficient automated system for analysis and prioritization. Previously, maintenance prioritization was carried out manually, with each asset analyzed individually, which required significant time and resources and hindered the rapid identification of critical components. The adoption of an automated methodology has standardized the process, with the daily generation of alerts referred to as triggers that guide the creation of anomalies in the maintenance engineering system, allowing predictive maintenance to be based on objective data and indicators, replacing the empirical and subjective analysis of operators with more precise and consistent decisions, contributing to the reduction of O&M response time and optimizing the targeting of actions toward the most critical assets. The integration of machine learning algorithms with automated prioritization tools has proven to be an effective solution for improving resource allocation and enhancing the reliability of wind power operations, enabling the management of thousands of customized models tailored to the specific characteristics of each wind turbine and its components. As a further development, this methodology is currently being expanded to Small Hydroelectric Power Plants (SHPs), extending the benefits of predictive analytics to other renewable energy sources, supported by the accumulated expertise at the CMA, which now assumes a strategic role in supporting intelligent asset management across new energy matrices.

**Keywords:** Predictive maintenance, Automated prioritization and Wind energy

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento das fontes renováveis de energia tem impulsionado o desenvolvimento de soluções tecnológicas avançadas para garantir a confiabilidade e disponibilidade dos ativos em operação. No setor eólico, a grande quantidade de dados coletados por sensores distribuídos em milhares de aerogeradores cria um cenário propício para a aplicação de técnicas de inteligência artificial, especialmente na manutenção preditiva. Estudos, como o de Zhao et al. (2019), demonstram que a análise inteligente desses dados permite identificar, de forma antecipada, falhas em componentes críticos, como rolamentos principais (*main bearing*), geradores e caixas de engrenagens (*gearbox*), contribuindo para reduzir custos associados a paradas inesperadas e aumentar a disponibilidade operacional. Apesar desse potencial, as decisões rotineiras de Operação e Manutenção (O&M) ainda dependem frequentemente de análises manuais e da experiência dos operadores, o que compromete a padronização e dificulta a escalabilidade dos processos. Conforme apontado por Jardine et al. (2006), a adoção de abordagens automatizadas

baseadas em machine learning é fundamental para acelerar a priorização de falhas e aumentar a eficiência na gestão dos ativos.

Partindo dessa premissa, o Centro de Monitoramento de Ativos (CMA) desenvolveu uma metodologia inovadora baseada em modelos preditivos personalizados por componente monitorado. Inicialmente, o processo exigia a extração manual e periódica de dados do sistema SCADA, seguida da análise individual dos resultados para identificar quais anomalias justificavam ações de manutenção, prática que demandava tempo, alta especialização e oferecia resposta limitada frente à crescente complexidade dos ativos. A implementação de um fluxo automatizado permitiu a coleta contínua de dados, o envio automático de alertas e o uso de dashboards interativos para priorização das anomalias mais relevantes, resultando em ganhos significativos de agilidade e precisão, viabilizando a escalabilidade da solução e otimizando o uso dos recursos de O&M.

Mais do que aplicar modelos preditivos, a metodologia do CMA constitui um sistema inteligente de apoio à decisão operacional, transformando dados em ações concretas que impactam diretamente a confiabilidade e desempenho dos ativos. O sistema opera de forma contínua, totalmente integrado às ferramentas de manutenção existentes, e oferece flexibilidade para diferentes perfis de componentes e regimes operacionais. Diante dos resultados obtidos na operação eólica, a companhia planeja expandir a abordagem para outras fontes renováveis, como Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), demonstrando a versatilidade da solução e consolidando o CMA como uma plataforma estratégica de análise preditiva aplicada a múltiplas tecnologias. Este artigo apresenta os fundamentos dessa metodologia, os resultados alcançados e as perspectivas de ampliação para outros contextos do setor energético.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A manutenção preditiva de turbinas eólicas tem sido objeto de crescente interesse acadêmico e industrial, motivada pela necessidade de reduzir custos operacionais e aumentar a disponibilidade dos ativos. Diversos estudos exploram técnicas de monitoramento de condições, algoritmos de aprendizado de máquina e modelos estatísticos para antecipar falhas. Santiago et al. (2024) realizaram uma revisão sistemática de modelos *data-driven* aplicados à manutenção preditiva e prescritiva, destacando o potencial de aprendizado de máquina em prever falhas e recomendar ações corretivas. No entanto, os autores ressaltam que a maioria dos estudos ainda permanece restrita a ambientes de laboratório ou a conjuntos de dados limitados, com pouca validação em escala industrial. É justamente nesse ponto que se evidencia a contribuição prática do Centro de Monitoramento de Ativos (CMA), ao aplicar tais técnicas em uma frota real, de centenas de turbinas, em operação contínua.

Campoverde-Vilela et al. (2023) demonstraram que dados SCADA podem ser suficientes para antecipar falhas em mancais principais de turbinas eólicas, sem necessidade de sensores adicionais. Aplicando análise de componentes principais e detecção de anomalias, os autores identificaram desvios no comportamento dos mancais antes da ocorrência de falhas críticas, evidenciando o potencial do aproveitamento de dados já disponíveis nos sistemas de supervisão. Outros trabalhos, como os de Zhao et al. (2019), enfatizam a aplicação de *deep learning* no monitoramento da saúde de máquinas. Contudo, a maior parte dessas iniciativas não avança para a integração direta com os processos de O&M, o que limita seu impacto prático. O CMA diferencia-se justamente por essa integração: os resultados dos

modelos preditivos não ficam restritos ao diagnóstico, mas são transformados em alertas prioritizados, que alimentam automaticamente o sistema de gestão da manutenção da companhia.

Estudos recentes reforçam a eficácia do monitoramento baseado em dados SCADA para a detecção precoce de falhas em turbinas eólicas. Schlechtingen & Santos (2011) demonstraram que a modelagem do comportamento normal das turbinas permite identificar desvios relevantes, contribuindo para a detecção antecipada de falhas. De forma complementar, trabalhos como os de Buchberg & Vugs Nielsen (2025) enfatizam o uso de técnicas de aprendizado de máquina, incluindo *deep learning*, para monitoramento da saúde de máquinas e detecção de anomalias em componentes críticos. Esses estudos evidenciam o potencial das abordagens *data-driven* para identificar falhas antes que elas causem impactos significativos, embora os trabalhos foquem prioritariamente na detecção, sem detalhar a priorização ou integração direta com processos de operação e manutenção. Soe & Htet (2024) apontam os desafios remanescentes, como a qualidade dos dados, a generalização dos modelos e a implementação em tempo real, destacando a necessidade de integrar soluções baseadas em dados com sua aplicação prática em larga escala, de modo a tornar a manutenção preditiva verdadeiramente automatizada e confiável.

Assim, a literatura aponta avanços significativos na transição de métodos tradicionais para sistemas automatizados e inteligentes de manutenção preditiva, nos quais os dados SCADA, combinados com aprendizado de máquina e suporte à decisão, permitem não apenas detectar falhas, mas também priorizar ações de forma escalável. A metodologia do CMA se insere nesse contexto, integrando múltiplos modelos preditivos com camadas de priorização automatizada, traduzindo análises em decisões operacionais concretas e oferecendo um exemplo de aplicação prática em larga escala no setor eólico brasileiro.

### **3. DESENVOLVIMENTO**

O desenvolvimento deste trabalho concentra-se na implementação de uma metodologia avançada para análise preditiva e priorização da manutenção em aerogeradores, combinando automação, gestão inteligente de dados e integração com os sistemas operacionais. A seguir, são apresentados os principais processos que compõem essa solução, desde a coleta e validação dos dados até a automação da análise e priorização, passando pela integração com as equipes e sistemas de manutenção. Ao final, discutem-se os impactos práticos da ferramenta no ambiente operacional e as perspectivas de expansão para outras matrizes renováveis.

#### **3.1. Coleta e Processamento de Dados no CMA**

O Centro de Monitoramento de Ativos (CMA) é responsável pela supervisão contínua de milhares de aerogeradores espalhados por diferentes regiões do país. Diariamente, o CMA recebe fluxos massivos de dados operacionais extraídos dos sistemas SCADA de cada unidade geradora. Esses dados incluem variáveis de desempenho de componentes críticos como *main bearing*, gerador e *gearbox*, além de parâmetros ambientais e elétricos. Para assegurar a confiabilidade analítica dos modelos, os dados operacionais são automaticamente processados por um PIMS (*Plant Information Management System*), responsável por validar a integridade dos sinais, corrigir inconsistências, interpolar falhas de comunicação e padronizar as variáveis de entrada. Além dos dados brutos coletados em tempo real, o CMA enriquece



- Alarmes de *machine learning* sem anomalias abertas, que representam potenciais falhas ainda não tratadas;
- Alarmes de *machine learning* com anomalias abertas por modelos convencionais (não baseados em *machine learning*), que exigem atenção redobrada, pois dois sistemas distintos convergiram na identificação da mesma anomalia;
- Alarmes de *machine learning* com anomalias abertas pelo próprio modelo, nos quais é necessário monitorar o andamento da tratativa, especialmente quando o alerta persiste por vários dias sem resolução.

Modelos CMA	2025-05-28	2025-05-29	2025-05-30	2025-05-31	2025-06-01	2025-06-02	2025-06-03
WTG - GE - MW1_017 - Gearbox - Gearbox óleo - Temperatura - V2	1	0	1	0	0	0	0
WTG - GE - MW1_018 - Gerador Mecânico - Rolamento Lado Acoplado DE - Temperatura - V2	1	1	0	0	0	0	1
WTG - GE - MW1_019 - Gearbox - Gearbox óleo - Temperatura - V2	1	0	0	0	0	0	1
WTG - Siemens - CBR_001 - Gerador Mecânico - Rolamento Lado Acoplado DE - Temperatura - V2	1	0	0	0	0	0	0
WTG - Siemens - CBR_002 - Main Bearing - TempRodTras_V2 - Temperatura - V2	1	0	0	0	0	0	0
WTG - Suzlon - ART_002 - Gerador Mecânico - DE_RMS_g_10_5000 - Vibração - V2	1	1	1	1	1	1	1
WTG - Suzlon - ART_003 - Gerador Mecânico - NDE_RMS_mms_10_5000 - Vibração - V2	0	0	0	0	1	1	1
WTG - Suzlon - BWS_001 - Gearbox - LSS_RMS_g_10_2000 - Vibração - V2	1	0	1	1	1	0	0
WTG - Suzlon - BWS_012 - Gerador Mecânico - DE_RMS_g_10_5000 - Vibração - V2	0	0	0	0	0	1	0
WTG - Suzlon - BWS_014 - Gerador Mecânico - NDE_RMS_mms_10_5000 - Vibração - V2	1	1	1	1	1	1	1

Figura 2: Priorização de gatilhos

Na figura do e-mail apresentado, os números indicam a presença ou ausência de alarmes gerados no dia correspondente, sendo 1 quando ocorreu alarme e 0 quando não houve. Um alarme é registrado sempre que mais de 50% dos pontos de dados extraídos em intervalos de 10 minutos ficaram acima dos valores previstos pelo modelo preditivo, indicando um desvio significativo no comportamento esperado do componente monitorado. Essa análise diária binária permite acompanhar de forma precisa quais ativos apresentam comportamento anômalo de forma recorrente, facilitando a priorização das intervenções pela equipe técnica. Dessa maneira, é possível identificar rapidamente tendências e focar recursos nos ativos que demandam atenção, promovendo maior eficiência e assertividade na gestão operacional.

Para apoiar ainda mais a análise diária, todas essas informações são integradas a um dashboard operacional interativo, conforme mostrado na Figura 3. Esse painel consolida os dados dos modelos preditivos com os registros de anomalias em sistemas de manutenção, permitindo visualização gráfica dos alertas ativos, que podem ser filtrados por parque eólico, contagem de ocorrências e período. A interface destaca automaticamente ativos com alertas persistentes, ocorrências críticas ou situações que ainda não receberam ações corretivas, facilitando a priorização estratégica por parte da equipe do CMA.

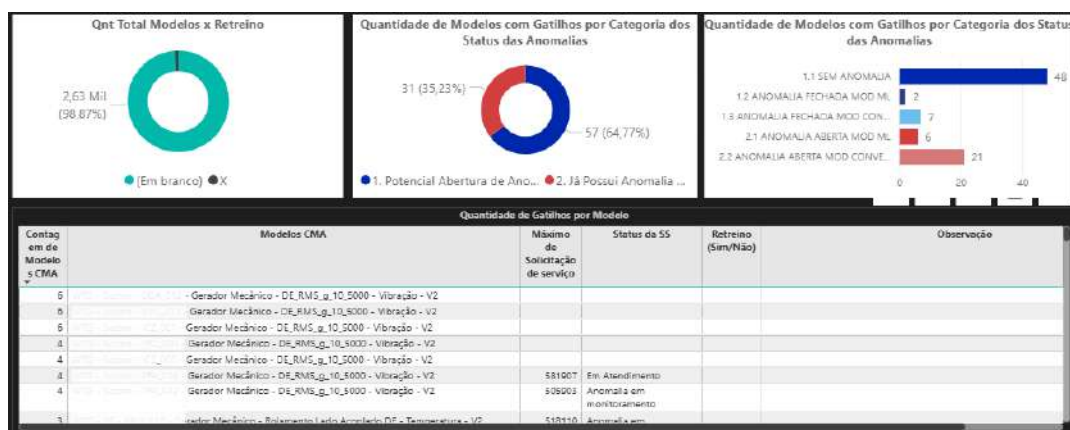


Figura 3: Dashboard interativo de gatilhos

Essa estrutura composta por e-mails inteligentes e dashboards integrados reforça a rastreabilidade, padroniza decisões e aumenta significativamente a agilidade operacional. Com isso, o CMA consegue escalar o monitoramento e a priorização de milhares de ativos simultaneamente, mantendo elevado o nível de confiabilidade dos aerogeradores e reduzindo o risco de falhas catastróficas.

### 3.4. Integração Operacional e Resultados no Ambiente Real

O sistema de priorização está totalmente integrado ao sistema de gestão de manutenção da companhia, permitindo a abertura automatizada de anomalias no sistema de engenharia, com todas as informações essenciais já anexadas, como o histórico completo do componente, gráficos das variáveis críticas, o tipo de anomalia identificada e o score do alerta gerado. Essa integração automatizada facilita o fluxo de trabalho, garantindo que as equipes técnicas tenham acesso imediato a dados precisos e detalhados, o que agiliza a tomada de decisão e a execução das ações corretivas. A rotina operacional do Centro de Monitoramento de Ativos (CMA) foi reorganizada para contemplar o monitoramento matinal dos dashboards de alertas, seguido da revisão criteriosa dos casos críticos e do direcionamento eficiente das ações para as equipes de campo. Com isso, a rastreabilidade das decisões foi significativamente aprimorada, permitindo um acompanhamento transparente e detalhado de cada intervenção, enquanto o tempo médio de detecção e posterior abertura de anomalias caiu consideravelmente, refletindo ganhos expressivos em eficiência operacional.

A Tabela 1 apresenta uma comparação das Solicitações de Serviço abertas pelo CMA de uma frota específica, no período de outubro a dezembro de 2024. O levantamento considera o tempo decorrido entre a detecção do gatilho e a abertura efetiva da anomalia pelo engenheiro responsável. Durante esse período, foram registradas 228 solicitações de serviço. Os resultados apontam para uma redução significativa no tempo médio de resposta ao comparar o processo convencional com o modelo automatizado, evidenciando ganhos expressivos de eficiência com a adoção da metodologia automatizada em relação à convencional ao longo desses três meses.

Tabela 1. Tempo médio no processo de abertura de anomalias pelo CMA entre outubro e dezembro de 2024.

Tipo de Priorização	Tempo Total
Priorização Manual	230 h
Priorização Automatizada	78 h

Desde a implementação da metodologia, o processo já evitou dezenas de falhas críticas em componentes de alto custo, muitas vezes com semanas de antecedência. Isso resultou em aumento substancial na disponibilidade das máquinas, redução de custos relacionados a paradas não planejadas e maior previsibilidade das atividades para o time de engenharia.

Os resultados obtidos reforçam achados da literatura internacional, como os de Schlechtingen & Santos (2011), que destacam ganhos de eficiência com automação de diagnósticos. No entanto, este estudo avança ao apresentar evidências concretas em ambiente real, demonstrando redução do tempo total de resposta de 230h para 78h e aumento da disponibilidade operacional. Ao integrar modelos preditivos customizados com priorização diária, a metodologia contribui de forma inédita para o fechamento da lacuna entre pesquisa e aplicação prática, conforme identificado em Santiago et al. (2024).

O sucesso comprovado dessa abordagem possibilitou a expansão do uso da metodologia para outras fontes de geração renovável, como as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), onde pilotos já estão em andamento para adaptar a lógica de modelagem e priorização às variáveis específicas e desafios operacionais dessa tecnologia. Essa expansão evidencia a escalabilidade da solução e reforça o compromisso da companhia em promover uma gestão preditiva multitecnologia, alinhada às demandas de confiabilidade, eficiência e sustentabilidade do setor energético. Além disso, a adoção de uma arquitetura flexível, desenvolvida internamente, garante maior independência de fornecedor, assegurando liberdade tecnológica e facilidade de evolução contínua da solução conforme as necessidades do negócio.

#### 4. CONCLUSÕES

A implantação do processo automatizado de análise preditiva e priorização no Centro de Monitoramento de Ativos (CMA) representa mais do que uma modernização tecnológica: trata-se de uma mudança de paradigma na gestão da manutenção do setor eólico. Ao transformar grandes volumes de dados brutos em decisões inteligentes e acionáveis, a companhia elevou significativamente a confiabilidade e a disponibilidade dos aerogeradores, criando um modelo operacional resiliente e escalável, capaz de atender às demandas complexas e dinâmicas do mercado de energia renovável. Essa transformação liberou a equipe de Operação e Manutenção das limitações do trabalho manual e subjetivo, ampliando sua capacidade estratégica, acelerando o tempo de resposta e fomentando uma cultura organizacional orientada à antecipação e prevenção de falhas, além de reduzir a dependência de processos burocráticos e demorados relacionados a contratos com fornecedores.

O sucesso do CMA demonstra como a convergência entre inteligência artificial, automação e integração sistêmica pode impulsionar a eficiência operacional, reduzir custos e promover a sustentabilidade ambiental do parque eólico. Além disso, o aprendizado contínuo da equipe técnica, fortalecido pela autonomia gerada pelo sistema, contribui para tomadas de decisão mais assertivas e para a consolidação de competências estratégicas internas, fortalecendo a resiliência organizacional. A ampliação da metodologia para outras fontes renováveis, como Pequenas Centrais Hidrelétricas, reforça a maturidade da abordagem e o compromisso da companhia com a excelência operacional, indicando um caminho claro para a universalização da manutenção preditiva em um cenário energético cada vez mais diversificado e desafiador.

Com um processo já consolidado e automatizado, o próximo passo é expandir a inteligência operacional e a capacidade adaptativa do sistema. Entre as oportunidades estão a incorporação de análises preditivas voltadas ao próprio processo, como a previsão de sobrecarga futura nas equipes de O&M, e o uso de algoritmos de priorização dinâmica que reajustem automaticamente o peso dos alertas conforme o comportamento agregado da frota, otimizando a alocação de recursos em cenários complexos. Além disso, a integração com indicadores estratégicos de negócio permitirá que decisões de manutenção considerem não apenas o risco técnico, mas também o impacto financeiro, a disponibilidade contratual e metas operacionais. A expansão para outras tecnologias, como PCHs e energia solar, exige um processo modular e flexível, capaz de incorporar novos ativos sem reestruturações complexas.

Diferentemente de muitos trabalhos anteriores, que permanecem restritos a protótipos, este estudo apresenta um caso consolidado de aplicação prática em grande escala, evidenciando benefícios concretos na redução de falhas, na otimização de recursos e na independência frente a burocracias contratuais externas. Assim, o artigo contribui para a literatura ao mostrar como abordagens preditivas podem ser efetivamente integradas a sistemas de O&M no setor eólico brasileiro, servindo de referência para estudos futuros e para a expansão da manutenção preditiva em outros contextos renováveis, consolidando o CMA como modelo de inovação, eficiência, autonomia e gestão inteligente de ativos energéticos.

## REFERÊNCIAS

BUCHBERG, E. M.; VUGS NIELSEN, K. Condition monitoring with machine learning: A data-driven framework for quantifying wind turbine energy loss. *arXiv*, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2506.13012>.

CAMPOVERDE-VILELA, L.; FEIJÓO, M. C.; VIDAL, Y.; SAMPIETRO, J.; TUTIVÉN, C. Anomaly-based fault detection in wind turbine main bearings. *Wind Energy Science*, v. 8, p. 557–567, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5194/wes-8-557-2023>.

GEBRAEEL, N.; LAWLEY, M. A.; LI, R.; CRABTREE, J. Residual-life predictions from component degradation signals: A neural network approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 51, n. 3, p. 694–700, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.824875>

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). IEC 62506: Industrial process measurement, control and automation – General procedures for the assessment of measurement uncertainty. Genebra: IEC, 2013

- JARDINE, A. K. S.; LIN, D.; BANGELO, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 20, n. 7, p. 1483–1510, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0- based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, v.3, p. 18–23, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.
- MOBLEY, R. K. An introduction to predictive maintenance. 2. ed. Burlington: Elsevier, 2002.
- SANTIAGO, R. A. F.; BARBOSA, N. B.; MERGULHÃO, H. G.; CARVALHO, T. F.; SANTOS, A. A. B.; MEDRADO, R. C.; MELO FILHO, J. B.; PINHEIRO, O. R.; NASCIMENTO, E. G. S. Data-driven models applied to predictive and prescriptive maintenance of wind turbine: A systematic review of approaches based on failure detection, diagnosis, and prognosis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 169, p. 113347, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.113347>.
- SCHLECHTINGEN, M.; SANTOS, I. F. Comparative analysis of neural network and regression based condition monitoring approaches for wind turbine fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 25, n. 5, p. 1849–1875, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.12.007>.
- SOE, H. M.; HTET, A. A Comprehensive Review of SCADA-Based Wind Turbine Performance and Reliability Modeling with Machine Learning Approaches. *Journal of Technology Innovations and Energy*, v. 3, n. 3, p. 68–92, 2024. DOI: [10.56556/jtie.v3i3.1028](https://doi.org/10.56556/jtie.v3i3.1028)
- ZHAO, R.; YAN, R.; CHEN, Z.; MAO, K.; WANG, P.; GAO, R. X. Deep learning and its applications to machine health monitoring: A survey. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 115, p. 213–237, 2019. DOI: [10.1016/j.ymssp.2018.05.050](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050).

## **A CAUTELA NECESSÁRIA PARA CONSOLIDAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL**

Iara Cavalcante da Silva Freitas<sup>1</sup>

Universidade Federal do Ceará

larasilva1999@gmail.com

### **RESUMO**

O presente artigo constitui uma análise da indústria de hidrogênio verde que é objeto de discussão no panorama internacional e fruto de diversos investimentos, sob a perspectiva desse desenvolvimento na conjuntura brasileira a partir dos marcos legais estabelecido pelas Leis nº 14.948/2024 e nº 14.990/2024. O estudo também aborda o caso do projeto de uma usina de hidrogênio verde no Piauí, que é objeto de uma ação civil pública ajuizada pelo Ministério Público Federal (MPF) devido a irregularidades no licenciamento ambiental, como a falta de consulta às comunidades tradicionais e o fracionamento do licenciamento ambiental com incoerência ao princípio da precaução. Por fim, o texto aborda a possibilidade de lock-in tecnológico, onde a sociedade poderia ser confinada a tecnologias ineficazes, comprometendo a transição energética justa. A decisão precipitada por tecnologias e benefícios fiscais pode restringir as alternativas futuras, tornando a mudança mais complexa e onerosa. O texto propõe que o Brasil implemente uma estratégia regulatória adaptável e incremental para potencializar os benefícios competitivos na evolução da indústria de hidrogênio verde.

### **Palavras-chaves:**

Indústria; Regulação; Hidrogênio Verde; Licenciamento; Lock-in tecnológico.

### **ABSTRACT**

This article presents an analysis of the green hydrogen industry, which is a topic of discussion in the international arena and the result of several investments, from the perspective of its development within the Brazilian context based on the legal frameworks established by Laws No. 14.948/2024 and No. 14.990/2024. The study also addresses the case of a green hydrogen plant project in Piauí, which is the subject of a public civil action filed by the Federal Public Ministry (MPF) due to irregularities in the environmental licensing process, such as the lack of consultation with traditional communities and the fragmentation of the licensing process, disconnected from the precautionary principle. Finally, the text discusses the potential risk of technological lock-in, where society could become confined to ineffective technologies, hindering a just energy transition. Premature decisions regarding technologies and fiscal benefits may restrict future alternatives, making the transition more complex and costly. The paper proposes that Brazil implement an adaptable and incremental regulatory strategy to maximize competitive advantages in the development of the green hydrogen industry.

### **Keywords:**

Industry; Regulation; Green Hydrogen; Licensing; Technological Lock-in.

---

<sup>1</sup> Aluna do Programa de Pós-Graduação em Direito da Universidade Federal do Ceará. Advogada em Direito Regulatório e Energias no escritório R. Amaral Advogados; membro da Comissão de Matrizes Energéticas da OAB/CE e pós-graduanda em Direito de Energia pela PUC Minas.

## 1. INTRODUÇÃO

O hidrogênio renovável<sup>2</sup> é uma tecnologia disruptiva<sup>3</sup> que vem sendo discutida amplamente na agenda ambiental global. Atualmente, ele atua como um importante indutor de investimentos públicos e privados internacionais, promovidos por instituições financeiras, como o Banco Europeu do Hidrogênio (BEH) que é uma iniciativa de financiamento da Comissão Europeia voltada à aceleração do desenvolvimento da cadeia de valor do hidrogênio na Europa.

Identificado como uma solução estratégica no enfrentamento das mudanças climáticas, o hidrogênio renovável figura como vetor<sup>4</sup> para a descarbonização de processos produtivos e por conseguinte contribuindo de forma significativa para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), bem como necessário para atingimento das metas firmadas no Acordo de Paris de 2015, que propõe em limitar o aquecimento global a 1,5 graus Celsius até o final do século.

A produção atual de hidrogênio é dominada por combustíveis fósseis, sendo gerada principalmente em refinarias e indústrias petroquímicas, o que resulta em emissões significativas de CO<sub>2</sub>. Isso aponta para a necessidade urgente de transitar para a produção de hidrogênio de baixo carbono na realidade de emergência climática. Nesse viés, tem-se o hidrogênio renovável, ou hidrogênio de baixa emissão, que é produzido a partir de fontes de energia renováveis, como solar e eólica, ou ainda de fontes nucleares, ou de combustíveis fósseis com captura de carbono.

O foco desta pesquisa será especificamente o hidrogênio verde<sup>5</sup> que é a promessa no setor de energia de representar um novo momento da industrialização do Brasil. O H2V oferece um conjunto de benefícios sistêmicos, ao descarbonizar simultaneamente os setores de transporte, residencial, comercial e industrial (Brandon; Kurban, 2017).

---

<sup>2</sup> Segundo a Lei nº 14.948/2024, especialmente no art. 4º, alínea XIII, o conceito de hidrogênio renovável é definido como: “hidrogênio de baixa emissão de carbono, combustível ou insumo industrial coletado como hidrogênio natural ou obtido a partir de fontes renováveis, incluindo o hidrogênio produzido a partir de biomassa, etanol e outros biocombustíveis, bem como hidrogênio eletrolítico, produzido por eletrólise da água, usando energias renováveis, tais como solar, eólica, hidráulica, biomassa, etanol, biogás, biometano, gases de aterro, geotérmica e outras a serem definidas pelo poder público;”

<sup>3</sup> Com originalidade e relevância, o livro *The Hydrogen Economy*, do futurista Jeremy Rifkin, publicado em 2002, propiciou reflexões sobre a libertação dos combustíveis fósseis, com o fim da dependência das reservas do Oriente Médio, e a exploração do hidrogênio como fonte de energia, o que poderia ensejar uma nova revolução industrial. Além disso, essa nova revolução resultaria em novas configurações sociais, pautadas por parâmetros de sustentabilidade ambiental. Um trecho do livro ilustra bem essa perspectiva: “Na economia do hidrogênio, com sua rede de energia descentralizada e democratizada, é possível estabelecer povoados humanos por biorregiões, ecorregiões e georregiões que reflitam os padrões de povoamento de muitas comunidades bioquímicas da terra.” (p. 258).

<sup>4</sup> Em relatório produzido pela Agência Internacional de Energia (IEA) para o G20 em junho/2019, estabelece-se que o “hidrogênio limpo está atualmente desfrutando de um impulso político e empresarial sem precedentes, com o número de políticas e projetos em todo o mundo se expandindo rapidamente. Conclui que agora é o momento de ampliar as tecnologias e reduzir os custos para permitir que o hidrogênio seja amplamente utilizado”.

<sup>5</sup> Sob o ponto de vista técnico, o hidrogênio é diferenciado pelo teor de carbono associado à sua produção, correntemente tem-se buscado diferenciar essa origem de produção através do uso de jargões com referência à distinção de cores, (IEA, 2019): a) O “hidrogênio marrom ou preto” é aquele produzido de carvão mineral (de linhito é o “marrom” e de hulha ou antracito corresponde à cor “preta”) sem CCUS (captura, utilização e sequestro de carbono); b) O “hidrogênio cinza” é aquele produzido do gás natural sem CCUS; c) O “hidrogênio azul” tem se referido àquele produzido a partir de gás natural, mas com CCUS (eventualmente, se utiliza essa denominação também para o hidrogênio gerado a partir de outros combustíveis fósseis com CCUS); d) O “hidrogênio verde” tem sido definido, no jargão de mercado, como aquele é o produzido de fontes renováveis variáveis (particularmente, energias eólica e solar) via eletrólise da água.

Não obstante, Bezerra (2021) aponta em sua análise setorial, a previsão de que o mercado do hidrogênio verde em 2050 seja de aproximadamente US\$ 3 trilhões e que corresponda a 20% da produção de energia no mundo, além da produção anual atingir 90 GW à nível global.

Sendo assim, este artigo tem como objetivo contribuir para a pesquisa na área de energias, por meio da elaboração de uma revisão de literatura sobre o hidrogênio verde, sob a perspectiva do Brasil no desenvolvimento da indústria de hidrogênio, em comparação com o panorama mundial, que conta com investimentos bilionários. Em síntese, o desígnio é investigar as perspectivas e os desafios da consolidação da indústria de hidrogênio verde no Brasil, à luz dos recentes marcos legais instituídos pelas Leis nº 14.948/2024 e nº 14.990/2024, bem como dos riscos regulatórios, ambientais e tecnológicos que podem comprometer a sustentabilidade do setor.

O artigo também visa responder a questionamentos como: O Brasil está atrasado no desenvolvimento da indústria de hidrogênio? Em caso afirmativo, o que isso representa para o país no cumprimento das metas e acordos internacionais?

## **2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. DESAFIOS PARA O MERCADO HIDROGÊNIO NO BRASIL**

O marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono na conjuntura brasileira foi estabelecido por meio da Lei nº 14.948/2024 e da Lei nº 14.990/2024, que respectivamente dispôs dos conceitos da cadeia de produção do hidrogênio, instituiu o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixo Carbono (Rehidro) e a Política Nacional do hidrogênio de baixa emissão de carbono, enquanto no dispositivo legal subsequente cria-se o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). Nesse caso, é importante destacar que ambos os normativos sancionados em 2024 tiveram celeridade em suas tramitações no Congresso, pois tiveram origem no PL 2308/2023, com uma média de um ano e meio; portanto, o atraso na aprovação da legislação não foi uma questão na realidade do Brasil.

Para tanto, o marco legal estabelece alguns instrumentos centrais para o desenvolvimento da indústria de hidrogênio, entre os quais se destaca o Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2), fundamental para o protagonismo no mercado internacional. Esse sistema permite um nível de confiabilidade para a comercialização do hidrogênio, especialmente frente ao Mecanismo de Ajuste de Fronteiras de Carbono (CBAM), uma ferramenta de protecionismo<sup>6</sup> europeu. A certificação é de adesão voluntária e garante a rastreabilidade e a sustentabilidade do hidrogênio produzido no Brasil, atestando sua baixa emissão de carbono e facilitando sua aceitação em mercados internacionais europeus.

Em sequência, o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro) que dispõe sobre a suspensão de tributos (COFINS, PIS/PASEP e variantes de importação) para aquisição de bens e serviços na implantação de projetos e o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC) prevê concessão de crédito fiscal com uma estimativa de R\$ 18,3 bilhões em cinco anos para o setor.

Contudo, apesar da aprovação dos marcos legais em 2024, alguns instrumentos neles instituídos ainda carecem de detalhamento por meio de regulamentação infralegal, a qual, segundo declarações do Governo<sup>7</sup>, será efetivada por meio de decreto. O referido decreto, cuja edição é aguardada com

---

<sup>6</sup> Além disso, quando se trata de protecionismo ambiental ou protecionismo verde, ele é apresentado por Fredrick Erixon e Roderick Abbott (2009) como a implementação de políticas, que buscam limitar ou restringir a importação de certos produtos que não sigam critérios ambientais. Em muitos casos, nações menos desenvolvidas ou em fase de industrialização podem enfrentar dificuldades significativas para atender aos padrões mais rigorosos de redução de carbono impostos pelo CBAM (Global Development Policy Center, 2022).

<sup>7</sup> <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/coges-pnh2-recebe-contribuicoes-para-elaboracao-de-decreto-regulamentar-ao-marco-legal-do-hidrogenio-de-baixa-emissao-de-carbono>

expectativa e encontra-se atrasada, deverá estabelecer diretrizes claras acerca da concessão de incentivos fiscais e dos critérios de concorrência para o acesso aos subsídios, com vistas a proporcionar previsibilidade aos agentes econômicos na tomada de decisões de investimento e na busca por financiamentos.

Dentre os aspectos que o decreto precisará disciplinar de forma precisa, destacam-se: (i) a definição do ciclo de vida aplicável à contabilidade de emissões de carbono; (ii) harmonizar o sistema brasileira com certificações internacionais, especialmente no tocante ao conceito de *bidding zone*<sup>8</sup>, adotado na União Europeia, para comprovação de adicionalidade e renovabilidade da energia usada na produção de hidrogênio verde; (iii) a regulamentação do funcionamento de incentivos como o Rehidro e os créditos fiscais vinculados ao Programa de Hidrogênio de Baixo Carbono; (iv) o delineamento do processo concorrencial para o acesso a recursos públicos, assegurando isonomia e transparência; e (v) a indicação do ente gestor do Sistema Brasileiro de Certificação de Hidrogênio (SBCH2), bem como a fixação dos parâmetros técnicos e regulatórios a serem observados.

É claro que alguns instrumentos centrais da Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono carecem de aprofundamento, mas não apenas isso, o Brasil tem como desafio o desalinhamento entre a expansão do sistema de transmissão elétrica e a demanda de projetos de hidrogênio, em síntese, as plantas de hidrogênio verde de larga escala podem não conseguir conectar-se ao sistema elétrico, por uma questão de infraestrutura.

Os projetos de hidrogênio que estão sendo anunciados têm um potencial de impacto, sobretudo em razão da alta potência instalada prevista individualmente para cada planta, para o processo de planejamento da rede de transmissão. Os elevados montantes de carga associados a esses projetos trazem um desafio para o planejamento da transmissão, pois demandarão expressivos investimentos em reforços e ampliações da rede, que, ressalte-se, já enfrenta sobrecarga decorrente da intensificação do fenômeno do *curtailment*<sup>9</sup>, os quais deverão ser planejados sob medida para o atendimento dessas plantas industriais em áreas específicas da malha de transmissão.

Portanto, além dos desafios regulatórios, a infraestrutura da rede elétrica também representa um obstáculo relevante para acompanhar a inserção de plantas de hidrogênio e dos esperados data centers. Nesse contexto, é oportuno destacar que a cautela no desenvolvimento dessa indústria se justifica, igualmente, pelos desafios relacionados ao amadurecimento tecnológico, o que reforça a necessidade de ampliação dos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) no país.

## 2.2. PLANTA DE HIDROGÊNIO NO PIAUÍ E AS IRREGULARIDADES APONTADAS PELO MPF

Para uma abordagem mais clara sobre a necessidade de cautela no desenvolvimento de projetos de hidrogênio, cabe elucidar a Ação Civil Pública fruto do processo sob nº 1015531-92.2025.4.01.4002, ajuizada pelo Ministério Público Federal (MPF) que trata sobre o impacto em rio federal (Rio Parnaíba) e em Unidades de Conservação federais (Área de Proteção Ambiental Delta do Parnaíba e Reserva Extrativista Marinha Delta do Parnaíba), relacionados ao projeto de instalação de uma usina de produção

---

<sup>8</sup> Segundo o Regulamento (UE) 2019/943 do Parlamento Europeu define-se: “*bidding zone*” means the largest geographical area within which market participants are able to exchange energy without capacity allocation. Nesse caso, as *bidding zones*, no modelo europeu, correspondem, em regra, a regiões geográficas onde vigora um preço único de energia elétrica no mercado atacadista, refletindo as condições locais de oferta e demanda. Tais zonas operam como subsistemas relativamente autônomos, diferentemente do Brasil que possui suas regiões interconectadas por meio Sistema Interligado Nacional – SIN, então tem-se a necessidade de harmonizar esses aspectos para viabilizar a comercialização.

<sup>9</sup> Segundo a Agência Nacional Energia Elétrica (ANEEL), o *curtailment* é a redução forçada de produção de uma usina, redução esta determinada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que estava apta a suprir energia elétrica por indisponibilidade da rede de transmissão.

de hidrogênio verde em uma área total de 161,78 hectares<sup>10</sup> na região do Delta do Rio Parnaíba, em Parnaíba/PI.

O MPF foi instado por cerca de nove, entre as quais o Grupo de Trabalho sobre Impactos das Energias Renováveis (GETIER-PI), a Rede Ambiental do Piauí (REAPI), a Colônia de Pescadores de Ilha Grande, o Movimento de Pescadores e Pescadoras Artesanais do Piauí, o Conselho Pastoral dos Pescadores (CPP-PI), o Coletivo Antônia Flor (CAF) e a organização Filhas do Sol, que, por meio de uma carta, manifestaram preocupação quanto à ausência de consulta<sup>11</sup> e de informações prévias.

Nesse sentido, ação protocolada tem como pedido a anulação imediata das licenças prévia (PI-LP.05695-1/2023) e de instalação (PI-LI.03699-2/2025), concedidas pelo governo estadual por meio da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH), sob pena de multa diária de um milhão de reais.

A argumentação é que o licenciamento ambiental padeceu de inúmeras irregularidades, como: (a) a incapacidade da SEMARH em conceder a licença para o empreendimento, visto a potencial afetação de bem público federal; (b) a falta de envolvimento do ICMBio no processo de licenciamento ambiental, visto a afetação em unidades de conservação federais; (c) a inexistência de consulta prévia, livre e informada com as comunidades tradicionais; (d) a fragmentação do licenciamento ambiental; (e) a falta de outorga prévia para o uso de recursos hídricos, frente a sensibilidade da elevada quantidade de recursos hídricos a serem captados para a produção de hidrogênio; (f) a negativa da conexão do empreendimento ao Sistema Interligado Nacional – SIN, com subsídio aos riscos de colapso de tensão em diversas subestações adjacentes pela intensa demanda de energia necessária para o projeto; (g) falhas formais no processamento do licenciamento ambiental; e (h) a insuficiência na análise dos impactos ambientais, especialmente ao levar em conta os princípios da prevenção e da precaução.

No que tange ao ponto central do fracionamento do licenciamento ambiental, resultado de um conjunto de inobservâncias e irregularidades discriminadas anteriormente, observa-se que tal prática fragiliza a avaliação ambiental como um todo, comprometendo inclusive a proposição de medidas de mitigação, subdimensionando os impactos de forma integrada e desconsiderando os efeitos cumulativos e sinérgicos decorrentes da totalidade do empreendimento. Estima-se pelas Organizações da Sociedade Civil que apenas ¼ do empreendimento consta abrangido pelo licenciamento, que restante foi desconsiderado na avaliação ambiental.

Assim, a análise do licenciamento ambiental da planta de hidrogênio no Piauí evidencia, ou ao menos corrobora, que, além de o Brasil ainda carecer de um arcabouço regulatório mais detalhado e de medidas concretas para viabilizar o desenvolvimento da infraestrutura elétrica necessária, observa-se também a ausência de capacitação técnica adequada por parte dos órgãos competentes para recepcionar e avaliar os impactos de um projeto dessa magnitude.

Em uma situação como a presente, que, diga-se de passagem, representa apenas o início do que se projeta como uma nova onda de investimentos na indústria do hidrogênio, é indispensável que a análise seja conduzida à luz do princípio da precaução, conforme, inclusive, foi destacado no processo pelo MPF.

Fruto de um processo de consolidação normativa e de evolução doutrinária, o princípio da precaução configura-se como fórmula jurídica voltada à mediação diante da incerteza científica, sendo um princípio jurídico autônomo, com conteúdo próprio, capaz de atuar diretamente como *ratio decidendi*, dispensando qualquer mediação ou dependência de outros princípios ou regras para sua aplicação.

---

<sup>10</sup> Conforme informações do processo, a usina terá “capacidade máxima prevista de 2.221.000 toneladas por ano de amônia verde, 400.000 toneladas por ano de hidrogênio verde e 1.825.00 toneladas por ano de nitrogênio, cuja produção demandará a captação de 3.800 m<sup>3</sup> de água por hora e consumirá 3.000 MW de energia”.

<sup>11</sup> Em conformidade com a Convenção nº 169 da Organização Internacional do Trabalho (OIT), da qual o Brasil é signatário, e que foi internalizada por meio do Decreto nº 10.088/2019, “...o direito de serem consultados, de forma livre, prévia e informada, sempre que medidas legislativas ou administrativas possam afetá-los diretamente.”

Segundo a definição consagrada pela UNESCO (2005), o princípio da precaução exige a implementação de medidas preventivas sempre que uma atividade humana apresente riscos<sup>12</sup> de causar danos moralmente inaceitáveis, mesmo que esses riscos não sejam totalmente comprovados pela ciência, sendo apenas plausíveis, porém incertos.

Logo, trata-se de um princípio ético-jurídico que guia a ação estatal e administrativa em face da incerteza científica, colocando em primeiro lugar a preservação do meio ambiente e dos direitos fundamentais das gerações atuais e futuras.

### **2.3. RISCO DE LOCK-IN TECNOLÓGICO NO DESENVOLVIMENTO DA INDÚSTRIA DE HIDROGÊNIO VERDE**

De acordo com Acselrad (2009), a transição energética não pode ser apenas tecnológica ou mercadológica: ela deve envolver transformações estruturais que incorporem a justiça socioambiental, o respeito aos direitos territoriais e o protagonismo das populações locais.

Dessa forma, o desenvolvimento de uma nova indústria representa a necessidade de cautela pela produção de transformações sociais, econômicas e jurídicas, sendo fundamental nesse avanço evitar que ocorra o aprisionamento ou dependência de um determinado desenvolvimento intensivo em hidrogênio que inviabilize de fato a transição energética justa e repercuta em sérias implicações ambientais e sociais.

Considerando o estudo de alguns entraves em torno do desenvolvimento da indústria de hidrogênio verde apresentados até este momento, que fundamentam a necessidade de cautela, como as perspectivas jurídica e ambiental, é importante abordar uma dimensão da economia da inovação: o risco de *lock-in* tecnológico, também conhecido como aprisionamento tecnológico.

O *lock-in* pode ser entendido como um fenômeno econômico associado a escolhas tecnológicas realizadas nos estágios iniciais de desenvolvimento industrial, comumente baseadas em incentivos mal calibrados, ausência de maturidade regulatória ou pressões político-econômicas, que resultam em limitações às opções futuras, levando à cristalização de soluções ineficientes, caras ou inadequadas ao contexto nacional.

O agrupamento de decisões tecnológicas tomadas pelos agentes pode limitar futuros modelos, frequentemente fundamentados em limites auto-reforçadores, acarretando custos de investimento inestimáveis (*sunk costs*). Ainda que uma tecnologia seja mais avançada e economicamente viável, ela não será implementada pelo mercado (Araújo, 2014).

Ou seja, um sistema tecnológico predominante, com seus componentes e elevados custos de investimento, dificilmente será substituído por outro (Wilson e Grubler, 2011). Essa é a concepção do termo "lock-in tecnológico", conforme apresentado pelo modelo concorrencial entre tecnologias de Arthur (1989; 1994).

Nesse aspecto, os efeitos de trajetória ("path dependence"<sup>13</sup>) podem consolidar tecnologias não otimizadas apenas por decisões iniciais mal planejadas. Diferentes mecanismos explicativos e até mesmo sequências não reprodutivas podem desencadear processos de dependência da trajetória.

---

<sup>12</sup> Em 25 de novembro de 2024 foi aprovado na I Jornada Jurídica de Prevenção e Gerenciamento de Crises Ambientais, o Enunciado 31 do Conselho da Justiça Federal (CJF) que dispõe: "*Grandes empreendimentos devem se submeter a estudo de impacto climático, com vistas ao diagnóstico de emissões de gases de efeito estufa, como medida necessária à identificação de danos e riscos associados à crise climática, bem como para a adequada imposição de medidas de mitigação e compensação (art. 3º, incisos I, II, III e V, c/c art. 4º, inciso I, e art. 5º, inciso IV, todos da Lei n. 12.187/2010, bem como art. 2º, incisos II e IV, e art. 3º, incisos II e III, da Lei n. 14.904/2024*".

<sup>13</sup> O conceito de *path dependence* pode ser estabelecido da seguinte forma: "*as instituições eficientes [...], ao longo do tempo, adquirem estabilidade, o que as faz conservar sua estrutura normativa, tornando qualquer caminho ou rota de mudança dependente desta estrutura pré-estabelecida. Em cada passo da*

Por exemplo, incentivos fiscais concedidos de forma prematura ou descoordenada, baixo investimento em PD&I, dependência de infraestrutura que ainda não existe e escolhas equivocadas de *bidding zone* podem limitar o desenvolvimento da indústria de hidrogênio em determinadas regiões, representando um fenômeno inerente e determinante dos processos de difusão tecnológica.

Então, a sequência dos eventos e as escolhas iniciais em momentos críticos não são apenas história; elas moldam o presente e limitam as opções para o futuro. Logo, é essencial que, no desenvolvimento do setor de hidrogênio verde, por ser dependente de políticas públicas, adote-se uma abordagem incremental, baseada em um ambiente regulatório experimental (*sandbox regulatório*<sup>14</sup>), articulação institucional, análise de custo de oportunidade e cautela na definição de rotas tecnológicas para aproveitar as vantagens competitivas.

### 3. MÉTODO DO ESTUDO

O presente estudo adota uma abordagem qualitativa e pesquisa bibliográfica, baseada na citação de doutrinadores e técnicos do setor de energia, seja por meio de livros, de artigos científicos, de dispositivos normativos ou de textos disponíveis em sites confiáveis, com profunda investigação do tema, como ocorre na prática, e amplo desenvolvimento da teoria, sempre fazendo um link entre os dois para melhor compreensão.

Nesse viés, foram analisados diplomas normativos recentes, em especial a Lei nº 14.948/2024 e a Lei nº 14.990/2024, bem como documentos regulatórios produzidos pela ANEEL e EPE, relatórios institucionais e produções acadêmicas nacionais e internacionais sobre a indústria do hidrogênio verde.

Ademais, realizou-se a análise de um estudo de caso, especificamente sobre o projeto da usina de hidrogênio verde no Estado do Piauí por meio da leitura do processo judicial em curso ajuizada pelo Ministério Público Federal. Esse recorte empírico foi utilizado para ilustrar a necessidade de maturação dessa indústria, diante dos reflexos ambientais e sociais inerentes ao desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil.

Assim, a metodologia permeia pela revisão da literatura e a análise documental normativa com a observação crítica de um caso concreto, possibilitando avaliar os desafios e propor recomendações para a consolidação do setor no país.

### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante do exposto, no qual se discutiram os instrumentos pendentes de regulamentação, aguardados com expectativa pelo setor, assim como a necessidade de especialização técnica dos órgãos responsáveis por licenciar os empreendimentos de hidrogênio, com base no princípio da precaução, e, por fim, evitar uma condição de dependência e inflexibilidade que impede ou retarda a adoção de novas e mais eficientes soluções energéticas, relacionadas ao fenômeno do lock-in tecnológico.

Nesse contexto, a cautela não é sinônimo de paralisia, mas de estratégia, que deve ser promovida pela criação diretrizes claras, etapas intermediárias, avaliação de impacto contínuo e flexibilidade para redirecionar políticas públicas à medida que a tecnologia evolui.

---

*rota foram feitas escolhas – políticas e econômicas – que significaram alternativas que podem reforçar ou não seu curso" (North, 1993, apud. Fernandes, 2007, p. 5).*

<sup>14</sup> Segundo a Lei das startups – Lei nº 182/2021, especificamente no Capítulo V, art. 2º, inciso II, tem-se que: [...] ambiente regulatório experimental (*sandbox regulatório*): conjunto de condições especiais simplificadas para que as pessoas jurídicas participantes possam receber autorização temporária dos órgãos ou das entidades com competência de regulamentação setorial para desenvolver modelos de negócios inovadores e testar técnicas e tecnologias experimentais, mediante o cumprimento de critérios e de limites previamente estabelecidos pelo órgão ou entidade reguladora e por meio de procedimento facilitado (Brasil, 2021).

O Brasil tem condições de ser referência no desenvolvimento da indústria, mas deve considerar que detém um leque de outras tecnologias em desenvolvimento, como data centers, BESS, eólicas offshore, entre outras, que devem ser avaliadas de forma estratégica, frente aos investimentos e políticas públicas.

## REFERÊNCIAS

**ACSELRAD, H.** Justiça ambiental e construção de saberes: diálogos com o pensamento de Carlos Walter Porto-Gonçalves. *Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 20, p. 29-38, 2009.

**ARAÚJO, Kathleen.** The emerging field of energy transitions: progress, challenges, and opportunities. *Energy Research & Social Science*, v. 1, p. 112-121, 2014.

**ARTHUR, W. Brian.** Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. *The Economic Journal*, v. 99, n. 394, p. 116-131, 1989.

**ARTHUR, W. Brian.** Positive feedbacks in the economy. *The McKinsey Quarterly*, n. 1, p. 81, 1994.

**BEZERRA, F. D.** Hidrogênio Verde: nasce um gigante no setor de energia. *Caderno Setorial ETENE*, v. 6, n. 212, p. 1-13, 2021.

**BRANDON, N. P.; KURBAN, Z.** Clean energy and the hydrogen economy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 375, n. 2098, 20160400, 2017.

**BRASIL.** Lei nº 14.948, de 2024. Regula a criação do Sistema de Monitoramento de Hidrogênio Verde no Brasil. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2024.

**BRASIL.** Lei nº 182, de 2021. Dispõe sobre a regulamentação de energias renováveis no Brasil. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2021.

**DECRETO nº 10.088, de 2019.** Regulamenta políticas públicas relacionadas ao uso do hidrogênio como fonte energética. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2019.

**GLOBAL DEVELOPMENT POLICY CENTER.** *Relatório sobre Energia e Desenvolvimento Sustentável*. 2022.

**IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY.** *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities*. Report prepared by the IEA for the G20, Japan, 2019. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2803>. Acesso em: 17 jul. 2025.

**NORTH, D.** 1993, *apud*. FERNANDES, 2007, p. 5. *Entendendo o aprofundamento do lock-in no carbono a partir de um estudo sobre patentes de petrolíferas numa abordagem evolutiva*. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Guilherme-Gomes13/publication/328580761\\_Carbon\\_fuels\\_forever\\_Entendendo\\_o\\_aprofundamento\\_do\\_lockin\\_no\\_carbono\\_a\\_partir\\_de\\_um\\_estudo\\_sobre\\_patentes\\_de\\_petroliferas\\_numa\\_abordagem\\_evolucionaria/links/5bd7163c299bf1124fab334c/Carbon-fuels-forever-Entendendo-o-aprofundamento-do-lock-in-no-carbono-a-partir-de-um-estudo-sobre-patentes-de-petroliferas-numa-abordagem-evolucionaria.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Guilherme-Gomes13/publication/328580761_Carbon_fuels_forever_Entendendo_o_aprofundamento_do_lockin_no_carbono_a_partir_de_um_estudo_sobre_patentes_de_petroliferas_numa_abordagem_evolucionaria/links/5bd7163c299bf1124fab334c/Carbon-fuels-forever-Entendendo-o-aprofundamento-do-lock-in-no-carbono-a-partir-de-um-estudo-sobre-patentes-de-petroliferas-numa-abordagem-evolucionaria.pdf). Acesso em: 17 jul. 2025.

**REGULAMENTO (UE) 2019/943 DO PARLAMENTO EUROPEU.** Estabelece normas para o mercado interno de eletricidade da União Europeia. *Jornal Oficial da União Europeia*, 2019.

**RIFKIN, Jeremy.** *The Hydrogen Economy*. 2002. p. 258.

**UNESCO.** *The Precautionary Principle*. 2005. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001395/139578e.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2025.

**WILSON, Charlie; GRUBLER, Arnulf.** Lessons from the history of technological change for clean energy scenarios and policies. *Natural Resources Forum*, v. 35, n. 3, p. 165-184, 2011.

**GOVERNO DO BRASIL.** *Coges PNH2 recebe contribuições para elaboração de decreto regulamentar ao marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono.* Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/coges-pnh2-recebe-contribuicoes-para-elaboracao-de-decreto-regulamentar-ao-marco-legal-do-hidrogenio-de-baixa-emissao-de-carbono>. Acesso em: 18 jul. 2025.

**MORAIS, Muller.** *Path Dependence como ferramenta para política energética.* Disponível em: <https://saltheebooks.com.br/wp-content/uploads/2023/04/Path-Dependence-como-ferramenta-para-Polit-Muller-Morais.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2025.

**MEGAWHAT.** *Economia e política: MPF pede suspensão de licenças para planta de hidrogênio da Solatio no Piauí.* Disponível em: <https://megawhat.energy/economia-e-politica/empresas/mpf-pede-suspensao-de-licencas-para-planta-de-hidrogenio-da-solatio-no-piaui/>. Acesso em: 18 jul. 2025.

## Revestimento Duradouro e Sustentável para as Torres Eólicas Offshore

**Autor:** Ivan G Mattos

Jotun

Ivan.Mattos@jotun.com

### Resumo

---

Este artigo apresenta o sistema de revestimento Poliéster Reforçado com Flocos de Vidro (GFP) como uma solução comprovada para proteção anticorrosiva offshore e onshore. Com mais de 35 anos de durabilidade sem manutenção, o GFP contribui para a sustentabilidade ao reduzir o consumo de tintas, emissões de solventes e intervenções por corrosão. Utilizando flocos de vidro C-Glass como reforço, o revestimento oferece alta resistência e efeito barreira. A tecnologia possui histórico consolidado em aplicações offshore e onshore, com evidências técnicas que indicam potencial de proteção superior a 40 anos.

### Palavras-chaves:

Corrosão, Manutenção, Alto desempenho

### 1. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta o revestimento Poliéster com Flocos de Vidro (GFP) como uma solução comprovada para proteção anticorrosiva em ambientes offshore. Com mais de 35 anos de desempenho sem manutenção, o GFP oferece alta durabilidade, reduz custos operacionais e contribui para práticas sustentáveis, sendo validado por testes laboratoriais e inspeções em campo.

### 2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A proteção anticorrosiva de estruturas metálicas em ambientes offshore, especialmente na zona de respingos, é um desafio técnico recorrente. Historicamente, diversos sistemas de revestimento foram desenvolvidos para mitigar os efeitos da corrosão, com destaque para os sistemas epóxi, poliuretanos e revestimentos metálicos. No entanto, muitos desses exigem manutenção periódica, o que implica em altos custos operacionais e riscos associados à intervenção em áreas críticas.

O sistema de **Poliéster Reforçado com Flocos de Vidro (GFP)** representa uma evolução significativa nesse contexto. Os poliésteres são polímeros termofixos conhecidos por sua resistência química e mecânica, amplamente utilizados em setores como aeronáutico, naval e automotivo. A incorporação de **flocos de vidro C-Glass**, quimicamente inertes, confere ao revestimento propriedades de barreira superiores, aumentando sua durabilidade e resistência à penetração de agentes corrosivos.

Desde a década de 1980, o GFP tem sido aplicado com sucesso em estruturas offshore, como as plataformas do campo Ekofisk e o hotel Burj Al Arab, demonstrando desempenho excepcional por mais de três décadas. Estudos de análise de ciclo de vida (LCCA) realizados por instituições como a Royal Haskoning e a Fundação de Pesquisa Ostfold confirmam que o GFP reduz significativamente os custos de manutenção e supera os requisitos normativos, como os definidos pela **ISO 12944-9** e pela **NORSOK M-501**.

A fundamentação teórica que sustenta o uso do GFP está baseada em princípios de engenharia de materiais, química de polímeros e ciência da corrosão. Testes laboratoriais como **EIS, SEM, DMA** e **ATR-FTIR** reforçam a estabilidade estrutural e funcional do revestimento ao longo do tempo, mesmo em condições extremas de exposição.

Assim, o GFP se consolida como uma tecnologia madura, validada por normas internacionais e por décadas de aplicação prática, oferecendo uma solução de alto desempenho e baixa manutenção para ambientes offshore agressivos.

### **3. MÉTODO DO ESTUDO**

Testes realizados por laboratórios independentes, aliados a relatos de aplicação prática, evidenciam a redução dos custos ao longo do ciclo de vida dos ativos, bem como o prolongamento do desempenho funcional do sistema de revestimento. Exemplos serão apresentados para demonstrar a elevada aderência do produto ao substrato, mesmo após 35 anos de serviço contínuo em zonas de respingos de estruturas offshore.

Ensaio de impressão digital (fingerprint) confirmaram que a formulação da tecnologia aplicada há mais de três décadas permanece inalterada em relação à utilizada atualmente. Adicionalmente, a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) indicou que o revestimento aplicado há 35 anos continua eficaz na proteção anticorrosiva do ativo. Serão também apresentados testes complementares e recursos adicionais da tecnologia, com o objetivo de reforçar sua confiabilidade e desempenho em ambientes agressivos.

#### 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A pressão sobre os operadores para manter um CAPEX enxuto e aderir a uma vida útil de projeto de 25 anos levou à adoção de tecnologia adequada para proteção contra corrosão. No entanto, tecnologias existentes há muitas décadas têm sido utilizadas com notável sucesso em aplicações offshore desde a década de 1980 e continuam apresentando bom desempenho. Com a mudança para soluções sustentáveis, o CAPEX deixou de ser o principal fator, permitindo que a extensão do ciclo de vida seja considerada.

Em busca de novas soluções, o mercado tem demonstrado interesse em opções de alto custo que ofereçam longa durabilidade. Muitas dessas novas tecnologias precisam de apenas alguns anos de testes práticos para avaliar seu desempenho.

O Poliéster com Flocos de Vidro (GFP) oferece uma solução comprovada que atende às expectativas de desempenho dos operadores. O GFP protege as estruturas da Ekofisk desde a década de 1980, completando quase 40 anos desde sua primeira aplicação nas estruturas da Ekofisk, e protege o Burj Al Arab há 26 anos, e continua protegendo. A última inspeção, em 2021, não mostrou sinais de deterioração.

Em 1995, a LCCA, da Fundação de Pesquisa Ostfold, declarou: “Devido às melhores propriedades e à maior vida útil, o novo revestimento também reduzirá significativamente os custos totais do ciclo de vida do operador da plataforma offshore. O GFP terá uma vida útil funcional de pelo menos 25 anos, com uma redução no custo do ciclo de vida para operações de manutenção de 30 a 50% para uma plataforma média.”

Em 2013, a LCCA da Royal Haskoning, Holanda, declarou: “A solução mais econômica demonstrou ser um sistema de revestimento altamente durável. Esta solução não requer medidas adicionais. A necessidade de manutenção é praticamente nula/mínima e é necessária principalmente em caso de danos mecânicos. Para o Sistema 7 da Norsok, o GFP demonstrou claramente ser a solução mais econômica, pois a exigência é de proteção durável ao longo da vida útil da estrutura.”

Após uma avaliação completa pela DNV, um relatório de terceiros declarou no resumo executivo: “A durabilidade e a vida útil do GFP em ambientes de zona de respingos offshore estão documentadas como excedendo 30 anos de exposição sem qualquer manutenção.”

A camisa Ekofisk 2/4 A foi desativada após 48 anos de exposição offshore. A GFP foi aplicada a esta camisa em 1986, marcando 35 anos desde sua primeira aplicação durante uma campanha de manutenção offshore.

Amostras da estrutura foram cortadas e trazidas para terra para investigação laboratorial e vários testes foram conduzidos:

- DMA - Mecânica Dinâmica Análise
- SEM - Varredura elétron microscopia
- EDX - Espectroscopia de raios X dispersiva de energia (EDX)
- EIS - Eletroquímica impedância espectroscopia
- Aderência de remoção conforme ISO 4624
- ATR-FTIR - Espectroscopia de infravermelho com transformação de Fourier e reflexão total atenuada



**Figura 1: Jaqueta Ekofisk 2/4 A**

- O ATR- FTIR confirma que o produto aplicado no Ekofisk 2/4A é o mesmo GFP produzido atualmente.
- A análise de DMA indica que a exposição offshore causou um nível mais alto de reticulação do antigo sistema GFP.
- O exame SEM mostra boa fixação entre as camadas e distribuição homogênea de flocos de vidro dentro do revestimento, também em linha com a formulação da amostra de referência de GFP.
- A adesão ao arrancamento foi medida em 5,1 MPa e todas as três rupturas foram classificadas como 100% fratura tipo C. Ainda bom depois de 25-30 anos.

- As medições de EIS mostraram valores próximos a  $3 \times 10^8 \Omega \text{ cm}^2$  em baixas frequências (ou seja,  $<10 \text{ Hz}$ ) após 24 e 48 horas de condicionamento. Os dados mostram uma resposta consistente com um revestimento intacto, sem a presença de fenômenos de corrosão subsuperficial.

Além disso, dois FPSOs foram avaliados por meio de testes de adesão em 12 pontos na zona atmosférica, tanto a bombordo quanto a boreste, e em 10 pontos nas zonas de respingos azuis, tanto a bombordo quanto a boreste. Os resultados desses 22 pontos mostraram um valor médio de pull-off de 5,71 MPa, o que é muito bom após 22 anos de operação.

A DNV concluiu:

Documentação objetiva do desempenho da vida útil do GFP com base em inspeção de terceiros e medições de laboratório.

Nas estruturas de campo da Ekofisk, o GFP demonstrou ter um desempenho excepcionalmente bom, mesmo quando aplicado no local, em um ambiente menos controlado.

Espera-se que o GFP tenha continuado a proteger as estruturas desativadas se ainda estivesse em operação no Mar do Norte.

No geral, as inspeções de campo e as investigações de laboratório confirmam que o desempenho do revestimento deve exceder 30 anos de operação em zonas de respingos.

Avaliações em laboratórios terceirizados mostraram que o GFP supera os requisitos de teste para envelhecimento cíclico de acordo com a ISO 12944-9, mesmo para sistemas que exigem primers de zinco.

Test parameters	Requirements with Zinc Primer	Requirement without Zinc Primer	SFGP 1	SFGP 2
Corrosion Creep	< 3 mm	< 8 mm	2.2 mm	2.7 mm
Adhesion	> 5 MPa	> 5 MPa	8.2 MPa	9.1 MPa

**Tabela 1: Comparação de desempenho**

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O mercado offshore já possui uma solução comprovada que atende ao desejo do cliente por uma solução sem manutenção ou duradoura. Todos os dados apresentados comprovam isso, com verificação de terceiros formalizada por uma organização certificadora credenciada, a DNV.

## REFERÊNCIAS

1. ISO 4618, Tintas e vernizes — Termos e definições
2. ISO 4624, Tintas e vernizes — Ensaio de tração para aderência
3. ISO 8044, Corrosão de metais e ligas — Termos e definições básicos
4. ISO 8501 1, Preparação de substratos de aço antes da aplicação de revestimentos e produtos relacionados — Avaliação visual da limpeza da superfície — Parte 1: Graus de ferrugem e graus de preparação de substratos de aço não revestidos e de substratos de aço após a remoção geral de revestimentos anteriores
5. ISO 8501 3, Preparação de substratos de aço antes da aplicação de tintas e produtos relacionados — Avaliação visual da limpeza da superfície — Parte 3: Graus de preparação de soldas, bordas e outras áreas com imperfeições superficiais
6. ISO 8503 1, Preparação de substratos de aço antes da aplicação de revestimentos e produtos relacionados — Características de rugosidade da superfície de substratos de aço limpos por jateamento abrasivo — Parte 1: Especificações e definições para comparadores de perfil de superfície ISO para avaliação de superfícies limpas por jateamento abrasivo
7. ISO 8503 2, Preparação de substratos de aço antes da aplicação de revestimentos e produtos relacionados — Características de rugosidade da superfície de substratos de aço limpos por jateamento abrasivo — Parte 2: Método para classificação do perfil de superfície de aço limpo por jateamento abrasivo — Procedimento comparador
8. ISO 12944 5, Revestimentos e vernizes — Proteção contra corrosão de estruturas de aço por sistemas de revestimento protetor — Parte 5: Sistemas de revestimento protetor
9. ISO 15528, Tintas, vernizes e matérias-primas para tintas e vernizes — Amostragem
10. NORSOK M501 Ed 6 – Preparação de Superfície e Revestimento Protetor

## O Papel das Automações e Agentes de IA na Gestão de Energias Renováveis

Davi Staaks<sup>1</sup>, Ítalo Marques de Campos Maria<sup>2</sup>, Fabio Ribeiro<sup>3</sup>, Lucas Ribeiro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Graduado em Ciência de Dados; <sup>2</sup> Engenheiro Mecânico e de Segurança do Trabalho, pós-graduado em Engenharia da Qualidade; <sup>3</sup> Graduado em Análise e Desenvolvimento de Sistemas;

<sup>4</sup> Graduado em Sistemas de Informação.

<sup>1</sup> [davi.staaks.ext@afaplan.com.br](mailto:davi.staaks.ext@afaplan.com.br); <sup>2</sup> [italo.marques.ext@afaplan.com.br](mailto:italo.marques.ext@afaplan.com.br); <sup>3</sup> [fabio.ribeiro@afaplan.com.br](mailto:fabio.ribeiro@afaplan.com.br); <sup>4</sup> [lucas.rodriques.ext@afaplan.com.br](mailto:lucas.rodriques.ext@afaplan.com.br)

### RESUMO

A adoção de automações e agentes de inteligência artificial (IA) tem revolucionado a gestão do tempo, a eficiência operacional e o desenvolvimento das equipes nas organizações. Este artigo apresenta três casos internos de automação e IA implementados na Afaplan entre janeiro e junho de 2025, todos utilizando Python como base tecnológica. Por meio do mapeamento de processos, entrevistas e análise de dados antes e depois da implementação, verificou-se expressiva redução do tempo em tarefas repetitivas e fortalecimento da cultura orientada a dados. Os resultados indicam que integrar novas tecnologias à valorização dos colaboradores e à promoção de uma cultura de dados — baseada em decisões informadas, transparência e capacitação analítica — é essencial para uma transformação organizacional justa, inovadora e sustentável.

#### Palavras-chaves:

Automação; Agente de IA; Gestão; Cultura de Dados

### ABSTRACT

The adoption of automation and artificial intelligence (AI) agents has revolutionized time management, operational efficiency, and team development within organizations. This article presents three internal cases of automation and AI implemented at Afaplan between January and June 2025, all using Python as the core technology. Through process mapping, interviews, and data analysis before and after implementation, a significant reduction in time spent on repetitive tasks and the strengthening of a data-driven culture were observed. The results indicate that integrating new technologies with employee appreciation and the promotion of a data culture — based on informed decision-making, transparency, and analytical training — is essential for fair, innovative, and sustainable organizational transformation.

#### Keywords:

Automation; AI Agent; Management; Data Culture

## 1. INTRODUÇÃO

A percepção de tempo varia para cada pessoa, mas existe uma certeza: o tempo não volta. Nossas decisões de hoje impactam as decisões de amanhã, assim como nosso passado modela nosso presente. A partir disso, novas soluções foram implementadas visando “devolver” tempo aos colaboradores. Automatizar tarefas repetitivas é como reconquistar uma parcela do tempo que estava programada para rotinas e tarefas repetitivas, permitindo que os colaboradores direcionem o seu tempo para atividades criativas, analíticas e inovadoras.

Automações e agentes de IA surgiram para impulsionar o desenvolvimento e crescimento das empresas e colaboradores, e não para substituir o colaborador atual. Entretanto, o desafio está em promover capacitação para as equipes e realizar uma transição justa. Como enfatiza um artigo recente, “o desafio está em promover uma transição justa, que amplie oportunidades em vez de aprofundar desigualdades. Preparar pessoas para atuar com Inteligência Artificial é, portanto, uma estratégia essencial para construir um futuro do trabalho mais inclusivo” (MIT Technology Review Brasil, 2025).

Neste artigo, apresentamos como a implementação de tecnologias emergentes, apoiadas por uma cultura orientada a dados, contribui para o desenvolvimento e performance da equipe.

## 2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A implementação de novas ferramentas como automações e agentes de IA impacta de maneira significativa o desempenho de equipes, levando a empresa a outro nível. Para entender o impacto das novas tecnologias, é necessário esclarecer alguns conceitos:

**Automação:** são processos que envolvem tecnologia, programação e até mesmo robótica, que buscam minimizar a intervenção humana (IBM, 2023).

**Agente de IA:** é um sistema projetado para auxiliar a tomada de decisão humana (IBM, 2023), ou até mesmo automatizá-las. Diferencia-se das automações tradicionais por assumir tomadas de decisão em situações complexas.

**Python:** Python é uma linguagem de programação versátil, amplamente utilizada no desenvolvimento de automações e agentes de IA (Python Software Foundation, 2025).

**Grandes Modelos de Linguagem (LLM):** Grandes Modelos de Linguagem (do inglês Large Language Models - LLMs) são modelos de Machine Learning treinados com um grande conjunto de dados. Possuem a capacidade de compreender e gerar textos como um humano. Com o avanço das tecnologias, as LLMs começaram a gerar conteúdo multimídia, como vídeos e áudios (IBM, 2023).

O avanço tecnológico ocorre de maneira acelerada, impactando diretamente a dinâmica das empresas e equipes. À medida que surgem novas ferramentas, linguagens de programação, técnicas e plataformas de IA, torna-se imprescindível que as organizações alinhem essas inovações aos seus objetivos

estratégicos. Caso contrário, correm o risco de ficar “presas no tempo”, perdendo competitividade e capacidade de adaptação diante das mudanças do mercado.

Uma das grandes questões enfrentadas pelos gestores é: como selecionar a tecnologia mais adequada para a situação atual da empresa? Para isso, é essencial considerar qual a mentalidade e a cultura da organização em relação aos dados.

Em 2006, o matemático britânico Clive Humby afirmou que “os dados são o novo petróleo” (HUMBY, 2006). Atualmente, dados estão por toda parte; o que antes era um recurso escasso tornou-se abundante e de fácil acesso. Entretanto, não basta apenas ter matéria-prima (dados), mas também desenvolver uma mentalidade e cultura orientadas ao uso inteligente dessas informações. Dados devem servir para gerar conhecimento e fundamentar ações. Eles, por si só, não possuem tanto valor, da mesma forma que somente o petróleo sem o refinamento não possui valor.

Como destaca Rafael Coimbra (MIT Technology Review Brasil, 2025), “dados passaram a ser a base que sustenta a transformação digital. Sua abundância e complexidade exigem novas abordagens para extrair valor real e eficiente.” Diante desse cenário, automatizar processos de extração, transformação e carregamento (ETL) de dados, por exemplo, se torna um diferencial competitivo.

Investir na tecnologia certa pode transformar significativamente a forma e a velocidade com que decisões são tomadas nas empresas. Ao adotar automação e agentes de inteligência artificial, as organizações conquistam ganhos de produtividade, reduzem custos e avançam em pesquisa e desenvolvimento (P&D).

De acordo com o Talent Trends Report (2024), estudo conduzido com 1.076 diretores e líderes para identificar tendências em recursos humanos e aquisição de talentos, tarefas anteriormente trabalhadas para recrutadores passaram a ser delegadas a soluções automatizadas e de IA. Isso libera as equipes de RH para focarem na construção de relacionamentos e processos decisórios mais estratégicos (Talent Trends Report, 2024).

Esse benefício, entretanto, não é exclusivo do RH. A adoção de uma mentalidade orientada a dados e o investimento contínuo em automação e IA são indispensáveis para todos os setores da empresa, consolidando um diferencial competitivo e potencializando o crescimento sustentável da organização.

Investir em automação e inteligência artificial (IA) pode impactar significativamente o desenvolvimento das energias renováveis, tornando processos trabalhosos mais eficientes e dinâmicos, como exemplifica a utilização de algoritmos preditivos no processo de design de turbinas eólicas (BOŠNJAKOVIĆ et al., 2025).

## 2.1 CASES PRÁTICOS

### Case 1 – Automação de Faturas no Setor Financeiro

#### Situação:

Na empresa Afaplan (de origem portuguesa e com sede no Brasil, responsável pela engenharia do proprietário), o processamento de faturas financeiras era realizado manualmente, resultando em elevado tempo gasto com tarefas repetitivas e suscetíveis a erros operacionais.

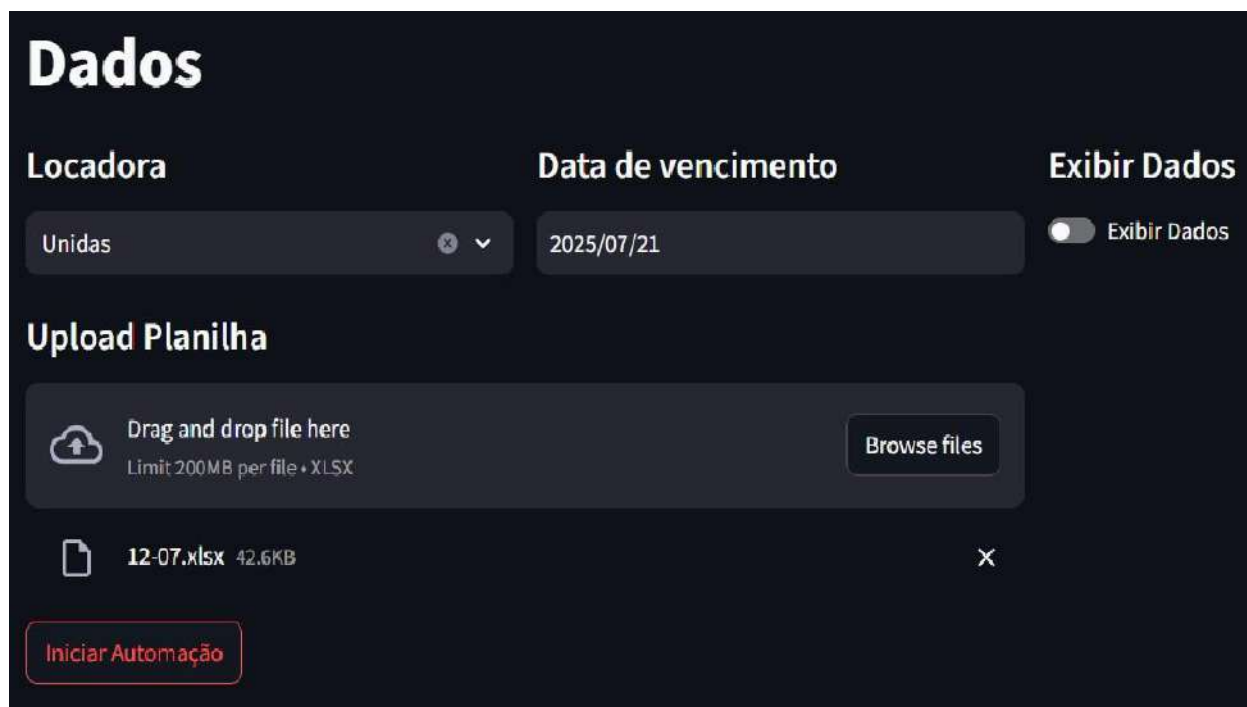
### Solução:

Foi implementada uma automação, desenvolvida em Python, capaz de inserir automaticamente as faturas na plataforma financeira. Para proporcionar melhor controle e usabilidade, desenvolveu-se um painel onde o colaborador insere uma planilha com os dados das faturas. O script realiza validações a fim de identificar e impedir a inserção de informações incorretas. Após essa etapa de checagem, o colaborador inicia o processo automatizado, garantindo precisão e redução de erros nas operações.

### Resultados:

- Redução de 93% no tempo dedicado ao lançamento de faturas;
- Equipe disponível para atividades analíticas e estratégicas;
- Diminuição de erros manuais e aumento da confiabilidade dos dados.

Figura 01 – Painel de Automação



The screenshot shows a dark-themed web interface for an automation panel. At the top left, the word "Dados" is displayed in large white font. Below it, there are three main sections: "Locadora" with a dropdown menu showing "Unidas", "Data de vencimento" with a date input field showing "2025/07/21", and "Exibir Dados" with a toggle switch. Below these is the "Upload Planilha" section, which includes a "Drag and drop file here" area with a file upload icon and a "Browse files" button. A file named "12-07.xlsx" (42.6KB) is shown as uploaded. At the bottom, there is a red button labeled "Iniciar Automação".

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

A implementação dessa automação reduziu significativamente a possibilidade de erros nos cálculos e na validação do sistema, uma vez que todo o processo de inserção de faturas foi mapeado, visando garantir

uma ingestão de dados de qualidade. Dados estruturados e preparados são etapas fundamentais para a futura integração com IA possibilitando análises preditivas e preventivas.

## Case 2 – Agente de IA para Análise de Licitações

### **Situação:**

O processo de análise e seleção de licitações era moroso e dependia da avaliação individual dos colaboradores, aumentando a chance de oportunidades perdidas ou análises subjetivas.

### **Solução:**

Um agente de inteligência artificial foi criado para analisar licitações automaticamente. O agente, alimentado por dados extraídos via Python, avalia cada licitação e decide se ela se enquadra no escopo de atuação da Afaplan.

### **Resultados:**

- Automatização do processo de seleção de licitações;
- Maior agilidade na tomada de decisão;
- Consistência e padronização dos critérios de elegibilidade.

A agilidade na tomada de decisão diante das oportunidades do mercado foi o principal ganho proporcionado por este agente de IA. O que antes era um processo moroso, envolvendo a pesquisa e análise manual de licitações para verificar se estavam dentro do escopo da Afaplan, tornou-se um procedimento automático que identifica rapidamente quais licitações fazem parte do escopo da empresa.

## Case 3 – Download Automático de Arquivos Gerenciais

### **Situação:**

A realização de backups e download de arquivos gerenciais era feita manualmente, o que demandava tempo significativo e representava risco de perdas de dados.

### **Solução:**

Foi implementada uma automação que acessa a plataforma de armazenamento, realiza o download programado dos documentos e executa a contagem dos arquivos para garantir a integridade dos quantitativos.

### **Resultados:**

- Processos de backup e controle tornaram-se automáticos e rastreáveis;
- Maior segurança e confiabilidade na gestão documental;

- Redução do esforço operacional envolvido nas rotinas de TI e engenharia.

Os resultados obtidos dessa automação evidenciaram ganhos significativos em segurança e confiabilidade no processo de backup da documentação. Antes manual e suscetível a falhas, o processo de verificação gerava preocupações constantes quanto à integridade dos arquivos. Com a automação, o processo mapeado e automatizado assegura que a documentação esteja sempre disponível e íntegra, evitando a perda de arquivos críticos e sensíveis ao projeto, reduzindo o esforço mental da equipe e aumentando a confiança na gestão de dados.

### **3. MÉTODO DO ESTUDO**

Os três casos apresentados neste artigo referem-se a projetos internos desenvolvidos na Afaplan entre janeiro e junho de 2025, todos utilizando a linguagem de programação Python como ponto de partida. Para mensurar o impacto das automações e dos agentes de IA, foi realizado um mapeamento dos processos antes e depois da implementação das soluções.

Entrevistas e reuniões foram conduzidas com as equipes diretamente envolvidas, permitindo coletar dados sobre a redução de tempo gasto em tarefas repetitivas e os principais benefícios percebidos. A análise comparativa foi feita a partir dos relatos das equipes e dos registros de tempo, possibilitando assim avaliar de forma qualitativa e quantitativa os resultados gerados pelos projetos.

### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

A adoção de automações e agentes de inteligência artificial demonstrou-se fundamental para otimizar o uso do tempo, aumentar a eficiência operacional e promover o desenvolvimento das equipes na Afaplan impactando de maneira eficiente a gestão das obras de energias renováveis.

Os resultados mostram que a integração entre tecnologia e cultura orientada a dados é essencial para garantir a adaptação das equipes e o aproveitamento das novas tecnologias.

Entretanto, o principal desafio na adoção da inteligência artificial e automações nas organizações é a transformação contínua da mentalidade organizacional. A integração dessas tecnologias não pode ocorrer de forma acelerada, exigindo mudanças graduais na forma como dados e informações são tratados, o que demanda tempo e dedicação. Muitas soluções eficazes de uma década atrás tornaram-se obsoletas diante das tecnologias emergentes, ressaltando a necessidade de adaptação constante. Assim, reconhecer que métodos que funcionaram no passado não serão suficientes para o futuro é, por si só, um dos maiores desafios para empresas que buscam inovação sustentável.

Por fim, destaca-se o desenvolvimento e investimento contínuo de novas tecnologias e do potencial dos colaboradores. É fundamental reforçar que a IA é para apoiar os humanos e não para substituí-los, tal perspectiva reforça uma transformação justa e sustentável do ambiente de trabalho. (Talent Trend Report, 2024).

## REFERÊNCIAS

IBM. O que são agentes de IA e automação? 2023. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/topics/automation>. Acesso em: 18 jul. 2025.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python: About. 2025. Disponível em: <https://www.python.org/about/>. Acesso em: 18 jul. 2025.

IBM. O que é LLM (Large Language Models)? 2023. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/large-language-models>. Acesso em: 18 jul. 2025.

HUMBY, C. Data is the new oil. 2006. Disponível em: <https://revistasb.com.br/en/front/article/50>. Acesso em: 19 jul. 2025.

COIMBRA, R. Dados são o motor da transformação digital. MIT Technology Review Brasil, 2025. Disponível em: <https://mittechreview.com.br/>. Acesso em: 19 jul. 2025.

BOŠNJAKOVIĆ, M.; MARTINOVIĆ, M.; ĐOKIĆ, K. Application of Artificial Intelligence in Wind Power Systems. Applied Sciences, v. 15, n. 5, p. 2443, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/5/2443>. Acesso em: 18 jul. 2025.

TALENT TRENDS REPORT. Talent Trends 2024. 2024. Disponível em: <https://www.randstad.com.br/estudos-globais/talent-trends-2024/>. Acesso em: 18 jul. 2025.

## LIGA METALICA Al–Ti–Mg como Alternativa à Fibra de Carbono

Hubert A. A. Alvarez(1)\*, Tahereh Namdari(2)\*\*, Diego A. H. Alvarez Gil(3)\*, Pedro J. A. Alvarez Gil(4)\*, Arnaldo Del Franzz Alvarez Gil(5)\*

[1] Hubert A. A. Alvarez: [alvahubert@gmail.com](mailto:alvahubert@gmail.com) (Autor correspondente)

[2] Tahereh Namdari: [tahereh.namdari@yahoo.com](mailto:tahereh.namdari@yahoo.com)

[3] Diego A. H. Alvarez Gil: [alvarezaugusto2003@gmail.com](mailto:alvarezaugusto2003@gmail.com)

[4] Pedro J. A. Alvarez Gil: [pedro.alvarez@rocketmidia.com](mailto:pedro.alvarez@rocketmidia.com)

[5] Arnaldo Del Franzz Alvarez Gil: [arnaldo@gmail.com](mailto:arnaldo@gmail.com)

(\*) Crom Engenharia, Natal–RN, Brasil

(\*\*) Razi University, Kermanshah, Irã

---

### RESUMO

Este estudo preliminar apresenta uma abordagem teórico-computacional para o desenvolvimento de uma liga ternária Al–Ti–Mg destinada à fabricação de pás eólicas, como alternativa sustentável e de menor custo à fibra de carbono importada. A metodologia integrou conceitos de Mecânica Quântica, Física do Estado Sólido e cálculos de primeiros princípios (DFT), com ênfase na análise de curvas de energia de coesão e da densidade de estados eletrônicos (DOS).

A energia de coesão permitiu identificar as fases cristalinas estáveis (Al–FCC, Mg–HCP, Ti–HCP) e os volumes atômicos ideais, evidenciando que o Al contribui com ductilidade e baixo custo, o Mg com leveza estrutural e o Ti com resistência mecânica e estabilidade térmica. A análise da DOS correlacionou propriedades eletrônicas com desempenho macroscópico, destacando o papel dos estados d do Ti na dureza e resistência à fadiga, bem como dos orbitais sp de Al e Mg na manutenção da ductilidade e leveza.

Os resultados indicaram que a liga Al–Ti–Mg atinge valores de resistência à tração comparáveis aos da fibra de carbono (~500–700 MPa), embora apresente maior densidade (~2,8–3,2 g/cm<sup>3</sup>) e módulo de elasticidade inferior (70–100 GPa). Em contrapartida, oferece vantagens estratégicas como custo reduzido, elevada reciclabilidade, boa resistência à corrosão (com tratamentos adequados) e compatibilidade com processos de manufatura locais (fundição, extrusão e impressão 3D).

Conclui-se que a liga Al–Ti–Mg representa uma alternativa viável para turbinas eólicas de médio e grande porte na América do Sul. Além disso, a integração de energia de coesão e DOS demonstrou ser uma ferramenta preditiva robusta para o design racional de materiais metálicos, contribuindo para o avanço de soluções sustentáveis alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

---

### Palavras-chave

[1] Ligas metálicas sustentáveis, [2] Energia de coesão, [3] Densidade de estados eletrônicos (DOS), [4] Pás eólicas, [5] Híbridaç o orbital, [6] Reciclabilidade

## ABSTRACT

This preliminary study presents a theoretical–computational approach to the development of a ternary Al–Ti–Mg alloy for wind turbine blades, as a sustainable and cost-effective alternative to imported carbon fiber. The methodology integrates concepts of Quantum Mechanics, Solid-State Physics, and first-principles calculations (DFT), with emphasis on the analysis of cohesive energy curves and electronic density of states (DOS).

Cohesive energy enabled the identification of stable crystalline phases (Al–FCC, Mg–HCP, Ti–HCP) and ideal atomic volumes, revealing that Al contributes ductility and low cost, Mg provides structural lightness, and Ti ensures mechanical strength and thermal stability. DOS analysis correlated electronic properties with macroscopic performance, highlighting the role of Ti d-states in hardness and fatigue resistance, as well as Al and Mg sp orbitals in maintaining ductility and lightness.

The results indicate that the Al–Ti–Mg alloy achieves tensile strength values comparable to those of carbon fiber (~500–700 MPa), although with higher density (~2.8–3.2 g/cm<sup>3</sup>) and lower elastic modulus (70–100 GPa). In contrast, it offers strategic advantages such as reduced cost, high recyclability, good corrosion resistance (with appropriate treatments), and compatibility with local manufacturing processes (casting, extrusion, and 3D printing).

It is concluded that the Al–Ti–Mg alloy represents a viable alternative for medium- and large-scale wind turbines in South America. Furthermore, the integration of cohesive energy and DOS proved to be a robust predictive tool for the rational design of metallic materials, contributing to the development of sustainable solutions aligned with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs).

## Keywords:

1.-Sustainable metallic alloys, 2.-Cohesive energy, 3.-Electronic density of states (DOS), 4. Wind turbine blades., 5.-Orbital hybridization., 6.-Recyclability

## 1. INTRODUÇÃO [1–5]

A energia eólica é fundamental para a transição energética na América Latina, mas seu avanço é limitado pela dependência de pás fabricadas com fibra de carbono importada da Europa, o que encarece a logística e reduz a autonomia tecnológica.

Para superar essa barreira, propõe-se o desenvolvimento de ligas metálicas leves baseadas em Al, Mg e Ti, com propriedades similares às da fibra de carbono (densidade  $< 3 \text{ g/cm}^3$ , resistência  $> 500 \text{ MPa}$ ), aproveitando minerais disponíveis na região.

Por meio da análise da energia total em função do volume e da densidade de estados eletrônicos (DOS), é possível identificar combinações estruturalmente estáveis e adequadas para ambientes tropicais e marinhos. Essa estratégia permite substituir materiais importados, fabricar pás modulares localmente e escalar a produção com tecnologias avançadas.

A abordagem busca reduzir custos, fortalecer a independência tecnológica e consolidar uma indústria eólica sustentável e competitiva na América Latina.

---

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA [6–12]

Este estudo fundamenta-se nos princípios da Mecânica Quântica e da Física do Estado Sólido, considerados essenciais para o desenvolvimento de ligas metálicas aplicadas ao setor eólico (KITTEL, 2005; ASHCROFT; MERMIN, 2016).

A energia de coesão expressa a estabilidade de um sólido, permitindo avaliar a robustez das ligações metálicas e identificar estruturas cristalinas estáveis (CALLISTER, 2014). De forma complementar, a teoria do estado sólido descreve como diferentes arranjos cristalinos — como a estrutura cúbica de face centrada (fcc), presente no alumínio, e a hexagonal compacta (hcp), característica do titânio e do magnésio — influenciam diretamente propriedades como resistência mecânica, densidade e comportamento frente à corrosão (ASKELAND; WRIGHT, 2011).

A análise da densidade de estados eletrônicos (DOS), associada à estatística de Fermi-Dirac, permite revelar características de estabilidade eletrônica (ZIMAN, 1972). Além disso, métodos de primeiros princípios baseados na Teoria do Funcional da Densidade (DFT) possibilitam prever, com elevada confiabilidade, propriedades estruturais e eletrônicas de materiais metálicos (HOHENBERG; KOHN, 1964; KOHN; SHAM, 1965).

Assim, a integração desses conceitos fornece a base científica necessária para o design racional de ligas metálicas sustentáveis destinadas à aplicação em pás eólicas.

---

### 3. MÉTODO DO ESTUDO [13–14]

O presente estudo foi desenvolvido mediante um enfoque teórico baseado na mecânica quântica de primeiros princípios e nos fundamentos do estado sólido, utilizando a energia de coesão como ferramenta central para correlacionar propriedades atômicas e eletrônicas com o comportamento macroscópico dos materiais. Para isso, aplicaram-se duas ferramentas fundamentais:

- **Energia de coesão:** utilizada para avaliar a estabilidade das estruturas cristalinas individuais de Al, Ti e Mg, bem como para prever os volumes atômicos ótimos e as fases estáveis. Os resultados forneceram uma estimativa direta da energia de ligação em cada rede cristalina, constituindo a base para avaliar a robustez estrutural dos metais considerados.
- **Densidade de estados eletrônicos (DOS):** aplicada tanto aos metais puros quanto à liga ternária Ti–Al–Mg, permitindo prever propriedades mecânicas (como dureza e resistência), estabilidade termodinâmica e resistência à corrosão a partir da estrutura eletrônica próxima ao nível de Fermi. Esse procedimento estabeleceu uma relação direta entre as características eletrônicas e o desempenho mecânico esperado.

A combinação desses métodos possibilitou projetar e otimizar a liga ternária Ti–Al–Mg sem a necessidade de síntese experimental inicial, fornecendo uma base científica sólida para sua futura validação experimental e aplicação tecnológica.

---

#### 3.1. Técnica de Energia de Coesão [15–21]

A técnica de energia de coesão, aplicada em conjunto com a análise da densidade de estados eletrônicos (DOS), constituiu a base científica para a construção e interpretação das Tabelas 1 e 2. Esse enfoque permitiu selecionar os metais candidatos — Mg, Ti e Al — e compará-los com a fibra de carbono, utilizada como material de referência.

Os cálculos de energia de coesão possibilitaram:

- Determinar a estabilidade das estruturas cristalinas individuais de Al, Ti e Mg.
- Prever os volumes atômicos ótimos e as fases estáveis.
- Avaliar a energia de ligação em cada rede cristalina.

Dessa forma, a técnica integrou as propriedades microscópicas — estabilidade eletrônica e estrutural em nível atômico — com as propriedades macroscópicas — densidade, resistência e compatibilidade — necessárias para o design sustentável da liga Ti–Al–Mg.

Sem a aplicação desse método, as Tabelas 1 e 2 teriam se limitado a comparações empíricas, sem uma fundamentação científica baseada na física de materiais. Em outras palavras, a energia de coesão fornece o marco teórico que transforma dados empíricos em critérios sólidos para a seleção e o design da liga ternária.

Finalmente, os resultados obtidos, sistematizados nas Tabelas 1 e 2, respaldam a viabilidade da liga Ti–Al–Mg para aplicações tecnológicas sustentáveis.

**TABELA 1. Propriedades Físicas: Mg, Ti, Al vs. Fibra de Carbono [Ref. 25–27]**

Propriedade Física	Magnésio (Mg)	Titânio (Ti)	Alumínio (Al)	Fibra de Carbono [Ref. 22–24]
Fase cristalina estável	hcp	hcp	fcc	Grafítica / Anisotrópica
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	~1,74	~4,5	~2,7	~1,5–1,8
Resistência à tração (MPa)	~200–300	~240–900	~90–600	~500–700
Módulo de elasticidade (GPa)	Não especificado	~100–120	~70	~70–300
Resistência à fadiga	Não especificado	Alta	Média	Alta
Ductilidade	Média	Média–Alta	Alta	Baixa (anisotrópica)
Aplicação principal	Estruturas leves	Aeroespacial / Marinha	Ligas industriais	Pás eólicas (leveza)
Vantagens principais	Baixo peso	Resistência + Anticorrosão	Ductilidade + Leveza	Rigidez + Leveza

Os resultados apresentados na Tabela 1 mostram as propriedades físicas dos metais em estudo e evidenciam que o uso da energia de coesão permitiu identificar a fase cristalina estável e o volume atômico ideal de cada elemento. Esses parâmetros se refletem diretamente em propriedades macroscópicas como densidade, resistência mecânica, ductilidade e módulo de elasticidade.

Em particular, observa-se que:

- **Mg** apresenta uma densidade semelhante à da fibra de carbono, o que favorece a leveza do material.
- **Ti** oferece a maior resistência e um módulo elástico adequado, próximos aos requerimentos estruturais da fibra de carbono.
- **Al** combina ductilidade e baixo peso, embora com módulo inferior, desempenhando o papel de metal de equilíbrio dentro do sistema.

Em conjunto, os resultados da Tabela 1 justificam a validade estrutural inicial de Mg, Ti e Al como candidatos apropriados para a formação da liga ternária Ti–Al–Mg.

**TABELA 2. Compatibilidade Individual dos Metais com a Fibra de Carbono**

Metal	Compatibilidade com a Fibra de Carbono	Justificativa Técnica
Magnésio (Mg)	● Média	Densidade semelhante à da FC (leve), porém resistência limitada (~200–300 MPa), sem dados confiáveis de módulo de elasticidade ou fadiga. Potencial para componentes secundários, mas não ideal para zonas críticas com carga cíclica ou estrutural.
Titânio (Ti)	● Alta	Excelente combinação de resistência mecânica elevada (até 900 MPa), módulo elástico adequado (~100–120 GPa) e resistência à fadiga. Boa sinergia estrutural com FC em zonas que exigem rigidez e durabilidade. Sua resistência à corrosão é ideal para ambientes marinhos.
Alumínio (Al)	● ● Média–Alta	Leve (~2,7 g/cm <sup>3</sup> ) e dúctil, com resistência variável (90–600 MPa). Módulo elástico inferior (~70 GPa) ao da FC, podendo gerar incompatibilidades de rigidez em estruturas mistas. Ainda assim, útil para conectores, carcaças e partes não estruturais. Boa usinabilidade.
Fibra de Carbono	✔ Máxima (referência base)	Alta rigidez e resistência à tração e fadiga, ideal para pás. Entretanto, seu comportamento anisotrópico exige integração cuidadosa com metais para evitar incompatibilidades térmicas ou mecânicas. Serve como material estrutural principal.

**Legenda**

- Alta compatibilidade → Pode ser integrada estruturalmente com FC em zonas críticas.
- Compatibilidade média → Adequada para aplicações complementares ou não estruturais.
- ✔ Compatibilidade total → Referência principal (Fibra de Carbono).

Os resultados indicados na Tabela 2 mostram que a análise da compatibilidade técnica, realizada por meio da energia de coesão, também permitiu avaliar a estabilidade atômica e a interação potencial entre as redes cristalinas dos metais e as propriedades anisotrópicas da fibra de carbono.

Esse estudo resultou em diferentes níveis de compatibilidade (alta, média, baixa), evidenciando que:

- **Ti** é o reforço estrutural principal, por sua alta resistência, módulo elástico e resistência à fadiga.
- **Al** atua como modulador de ductilidade e processabilidade, com compatibilidade média-alta.
- **Mg** contribui para a redução de densidade, embora sua resistência limitada o destine a funções complementares.

Dessa forma, foram estabelecidos os papéis funcionais de cada metal na futura liga ternária.

Portanto, a técnica de energia de coesão foi responsável por correlacionar propriedades atômicas e estruturais com respostas macroscópicas, permitindo que as Tabelas 1 e 2 oferecessem uma visão integrada da seleção de metais, suas propriedades físicas e sua compatibilidade técnica com a fibra de carbono.

Esse enfoque consolidou a base científica para o desenvolvimento de uma liga ternária Ti–Al–Mg, capaz de combinar leveza (Mg), resistência estrutural (Ti) e ductilidade/processabilidade (Al), constituindo uma alternativa sustentável e competitiva frente aos compósitos de fibra de carbono atualmente utilizados na construção de pás eólicas

### **3.2.- Análise Quantitativa: Liga Al–Ti–Mg vs. Fibra de Carbono**

A comparação entre a liga ternária Al–Ti–Mg, projetada computacionalmente, e a fibra de carbono permite identificar vantagens e limitações em propriedades-chave como densidade, resistência, rigidez, estabilidade e reciclabilidade.

A Tabela 3 resume os resultados estimados e estabelece uma base científica para avaliar a viabilidade da liga em aplicações eólicas, onde se requer um equilíbrio entre eficiência estrutural, sustentabilidade e custo.

**TABELA 3 – Estratégia e Análise Quantitativa: Liga Al–Ti–Mg vs. Fibra de Carbono**

Propriedade	Liga Al–Ti–Mg (Estimativa)	Fibra de Carbono [Ref.22-24]	Implicações
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	~2,8–3,2	1,5–1,8	A liga é mais densa, afetando a eficiência em pás longas, mas pode ser otimizada com maior teor de Mg.
Resistência à tração (MPa)	500–700	500–700	Comparável, mas depende de reforços e tratamentos térmicos para alcançar o limite superior.
Módulo de elasticidade (GPa)	70–100	70–300	Inferior, o que limita a rigidez em pás de grande porte; requer reforços (ex.: partículas cerâmicas).
Resistência específica (MPa·cm <sup>3</sup> /g)	200–350	300–400	Próxima, mas a fibra de carbono é superior devido à menor densidade.
Resistência à corrosão	Boa (com tratamentos)	Excelente (inerte)	A liga necessita de revestimentos para igualar a resistência em ambientes marinhos.
Estabilidade termodinâmica	Estável a 298 K, possíveis transições sob alta pressão	Muito estável	A fibra de carbono é mais resistente a condições extremas.
Custo de fabricação	Moderado	Alto	Vantagem principal da liga, especialmente em mercados sensíveis ao custo.
Reciclabilidade	Alta	Baixa	A liga é mais sustentável, o que representa uma vantagem frente às regulamentações ambientais.

A liga ternária Al–Ti–Mg apresenta-se como uma alternativa mais econômica, reciclável e sustentável em relação à fibra de carbono, com resistência mecânica comparável, mas com limitações em densidade, rigidez e resistência específica.

Embora a fibra de carbono domine em aplicações que exigem máxima leveza e desempenho estrutural extremo, a liga oferece oportunidades em projetos de energia eólica de médio porte e em mercados sensíveis ao custo.

Ajustando a composição percentual de Al, Ti e Mg, é possível otimizar parâmetros críticos como densidade, módulo de elasticidade e resistência específica, mantendo as vantagens em reciclabilidade e custo. Isso permite alcançar um desempenho estrutural próximo ao dos compósitos de carbono e ampliar sua aplicabilidade em contextos onde eficiência e sustentabilidade são prioritárias.

---

### **3.3.- Análise da DOS no Projeto da Liga Ti–Al–Mg para Pás Eólicas [15–21]**

O estudo da Densidade de Estados Eletrônicos (DOS) constitui uma ferramenta fundamental para avaliar as propriedades estruturais, eletrônicas e mecânicas de materiais metálicos antes de sua síntese experimental.

No desenvolvimento da liga ternária Ti–Al–Mg, a análise da DOS permite compreender:

- As interações atômicas entre os elementos;
- A coesão estrutural da liga;
- As contribuições eletrônicas específicas de cada metal.

Essas informações fornecem uma visão essencial sobre a resistência mecânica, a estabilidade térmica e o comportamento frente à corrosão.

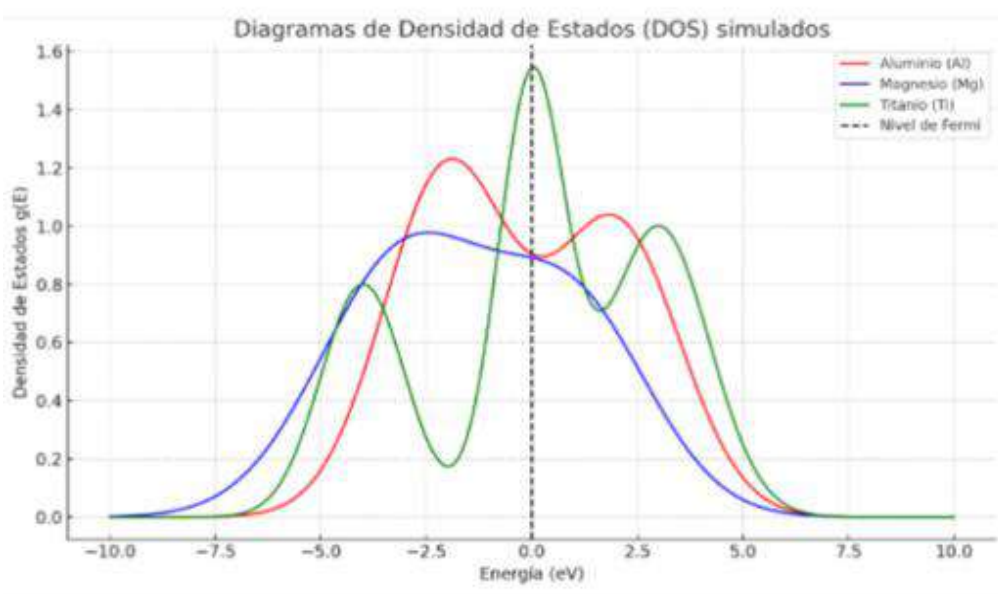
O objetivo desta etapa foi otimizar a composição da liga para aplicações em pás eólicas, assegurando um equilíbrio entre:

- baixa densidade;
- alta resistência mecânica e à fadiga;
- estabilidade química e térmica.

A análise foi realizada a partir do gráfico de DOS da liga Ti–Al–Mg e comparada com materiais de referência, como a fibra de carbono, a fim de compreender as interações eletrônicas que determinam suas propriedades estruturais e funcionais.

A interpretação do Esquema n.º 1 permitiu identificar que:

- A estabilidade eletrônica e a maior resistência à fadiga se explicam pela presença de um pseudogap próximo ao nível de Fermi ( $E_F$ ).
- A alta dureza e a resistência mecânica da liga se justificam pela contribuição dominante dos estados  $d$  do Ti próximos a  $E_F$ .
- A leveza e a ductilidade da estrutura metálica estão associadas às contribuições eletrônicas de Al e Mg.



**Esquema 1:** Diagrama de Densidade de Estados Eletrônicos – DOS

A partir da análise eletrônica de cada elemento, o impacto global da liga pode ser observado na tabela a seguir:

**Tabela 4 –** Comparação Direta (Al Puro vs. Liga Al–Mg–Ti)

Característica	Alumínio Puro	Liga Al–Mg–Ti
DOS perto do E <sub>F</sub>	Pico largo (sp)	Múltiplos picos (sp + d)
Contribuições eletrônicas	Orbitais 3s/3p	3s/3p (Al/Mg) + 3d (Ti)
Gap eletrônico	Inexistente (metal típico)	Possível pseudogap
Condutividade elétrica	Alta	Moderada (dispersão pelos orbitais d do Ti)

Entretanto, as propriedades físicas foram interpretadas a partir dos resultados da DOS (Esquema 1). Atribuímos as hibridações dos orbitais atômicos indicadas na Tabela 4 como responsáveis pela natureza da liga: a leveza e ductilidade de Al e Mg combinam-se com a resistência e dureza fornecidas pelo Ti, gerando assim uma estrutura estável e adequada para suportar cargas cíclicas típicas de turbinas eólicas.

Dessa forma, os resultados da Tabela 5 detalham as melhorias específicas que a liga Al–Ti–Mg oferece em relação ao alumínio puro, ressaltando a importância do alumínio como material base, mas agora potencializado pela adição de Ti e Mg. Esse efeito conjunto contribui de forma quantitativa (maior resistência mecânica, durabilidade e estabilidade térmica) e qualitativa (estrutura equilibrada, leve, rígida, resistente à fadiga, estável termicamente e menos suscetível à corrosão).

**Tabela 5 – Vantagens da Liga Al–Ti–Mg em Pás Eólicas**

Propriedade	Alumínio Puro	Liga Al–Ti–Mg	Benefício em Pás Eólicas
Densidade	2,7 g/cm <sup>3</sup>	~2,8–3,2 g/cm <sup>3</sup>	Redução de peso, menor carga estrutural.
Resistência mecânica	Baixa	Alta (devido a Al <sub>3</sub> Ti e Mg)	Suporta cargas de vento e vibrações.
Resistência à fadiga	Moderada	Alta	Maior durabilidade sob ciclos de carga.
Estabilidade térmica	Limitada	Melhorada (Al <sub>3</sub> Ti)	Resistência a variações bruscas de temperatura.
Corrosão	Boa (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Excelente (com contribuição do Mg)	Ideal para ambientes marinhos.

Assim, esta liga pode ser considerada um material ideal para a fabricação de pás eólicas, equilibrando eficiência estrutural, durabilidade e sustentabilidade, como já indicado nos resultados teóricos preliminares da Tabela 3.

## 5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste artigo, o uso combinado de curvas de energia de coesão e da análise da densidade de estados eletrônicos (DOS) consolida-se como uma estratégia preditiva e altamente eficaz para o projeto racional de materiais metálicos avançados, com foco na fabricação de pás eólicas sustentáveis. Esse enfoque é particularmente relevante em contextos geográficos como a América do Sul, onde fatores climáticos, econômicos e ambientais exigem soluções adaptadas, recicláveis e de baixo custo.

### 5.1. Energia de Coesão: Estabilidade e Seleção Estrutural

As curvas de energia de coesão foram utilizadas para identificar o ponto de mínima energia total em função do volume atômico, permitindo determinar a estrutura cristalina mais estável e a configuração ideal de ligação atômica de cada metal candidato:

- **Alumínio (Al):** estrutura cúbica de face centrada (FCC), boa ductilidade e baixo custo.
- **Magnésio (Mg):** estrutura hexagonal compacta (HCP), baixa densidade.
- **Titânio (Ti):** estrutura HCP, alta resistência mecânica e elevada resistência à corrosão.

A comparação entre as curvas individuais desses metais possibilitou prever a viabilidade de sua combinação em uma liga ternária (Al–Ti–Mg), sem a necessidade de ensaios destrutivos, orientando o projeto para uma solução termodinamicamente estável e adequada para suportar cargas mecânicas cíclicas em condições reais de operação.

## 5.2. DOS: Projeto Eletrônico para Propriedades Mecânicas e Químicas

A análise da DOS descreveu a distribuição dos níveis energéticos acessíveis aos elétrons de valência e permitiu antecipar propriedades críticas como:

- **Dureza e tenacidade:** associadas à elevada densidade de estados  $d$  do Ti próxima ao nível de Fermi ( $E_F$ ).
- **Estabilidade térmica e resistência à fadiga:** relacionadas à forma da DOS e à presença de pseudogaps.
- **Resistência à corrosão:** favorecida por baixos valores de DOS em  $E_F$ , indicando menor reatividade química.
- **Condutividade elétrica e térmica:** determinada pela sobreposição de bandas eletrônicas no nível de Fermi.

A DOS também revelou como a liga Al–Ti–Mg modifica o comportamento eletrônico do alumínio puro, incorporando os estados  $d$  do Ti e os níveis  $s$  do Mg, resultando em uma DOS mais complexa, capaz de reforçar a resistência mecânica sem comprometer a ductilidade.

---

## 5.3. Valor Estratégico para a América do Sul: Solução Local, Sustentável e Avançada

A América do Sul enfrenta desafios específicos na implementação de parques eólicos:

- Altos custos de materiais importados, como a fibra de carbono.
- Condições ambientais extremas (umidade, salinidade e variações térmicas).
- Necessidade de soluções recicláveis, adaptadas e fabricáveis com tecnologias locais.

Nesse cenário, a liga Al–Ti–Mg, identificada e otimizada por meio da energia de coesão e da análise da DOS, oferece uma alternativa viável e de baixo custo, atendendo aos requisitos mecânicos, térmicos e ambientais para turbinas de médio e grande porte.

Além disso, sua compatibilidade com processos de manufatura locais (extrusão, fundição e impressão 3D) e sua elevada reciclabilidade reforçam seu potencial dentro de um modelo de economia circular regional, alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

---

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente estudo preliminar demonstrou que a integração entre curvas de energia de coesão e a análise da densidade de estados eletrônicos (DOS) constitui uma metodologia sólida, econômica e de grande valor estratégico para o desenvolvimento de ligas metálicas avançadas aplicáveis ao setor eólico.

### 6.1. Considerações Finais

As simulações realizadas permitiram compreender, em nível atômico e eletrônico, as propriedades fundamentais dos metais candidatos — Alumínio (Al), Magnésio (Mg) e Titânio (Ti). Observou-se que:

- O **Alumínio (FCC)** confere ductilidade, baixo custo e boa processabilidade industrial.
- O **Magnésio (HCP)** contribui com baixa densidade e leveza estrutural, essenciais para reduzir a massa total das pás.
- O **Titânio (HCP)** agrega resistência mecânica, estabilidade térmica e elevada resistência à corrosão, características indispensáveis em ambientes agressivos (maresia, umidade, variação térmica).

A análise da DOS reforçou que a combinação desses elementos, sobretudo pela contribuição dos orbitais d do Ti, resulta em uma liga com maior dureza, tenacidade e estabilidade eletrônica, sem perda significativa da ductilidade proporcionada pelo Al e Mg.

---

## 6.2. Conclusões

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que:

- A liga Al–Ti–Mg apresenta-se como alternativa viável à fibra de carbono, atendendo às exigências de desempenho mecânico, térmico e químico, com menor custo e maior reciclabilidade.
  - O uso das curvas de energia de coesão permitiu prever a estabilidade das fases cristalinas e selecionar a proporção adequada dos metais, reduzindo a necessidade de ensaios experimentais iniciais.
  - A análise da DOS possibilitou antecipar propriedades críticas como resistência à fadiga, condutividade e resistência à corrosão, consolidando a liga como material competitivo frente às opções importadas e de alto custo.
  - A metodologia proposta promove uma ponte entre teoria e prática, permitindo que o desenvolvimento de novos materiais seja guiado por critérios quânticos e termodinâmicos antes da fabricação.
- 

## 6.3. Recomendações

Com base nas análises e conclusões, recomenda-se:

- Síntese experimental da liga Al–Ti–Mg em diferentes proporções atômicas, para validar os resultados preditivos.
- Ensaios mecânicos e de fadiga em condições simuladas de operação de pás eólicas, visando confirmar a estabilidade estrutural em longo prazo.
- Estudos de corrosão acelerada em ambientes salinos e úmidos, típicos do litoral sul-americano, para avaliar a durabilidade em condições reais.
- Aplicação da metodologia em outras combinações metálicas de interesse para o setor energético (ex.: ligas para baterias, sistemas de hidrogênio e estruturas offshore).
- Integração com processos de manufatura locais (fundição, extrusão, impressão 3D), para garantir viabilidade industrial e fortalecimento da cadeia produtiva regional.

#### 6.4. Impacto Estratégico

A aplicação prática desta metodologia pode posicionar a América do Sul como protagonista no desenvolvimento de materiais sustentáveis e competitivos para a indústria energética global, alinhando ciência, inovação e sustentabilidade dentro dos ODS.

#### 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.-Askeland, D. R.; Wright, W. J. *The Science and Engineering of Materials*. 7. ed. Boston: Cengage Learning, 2011.
- 2.- Callister, W. D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*. 4. ed. New Jersey: Wiley, 2014.
- 3.- Hehenberg, P.; Kohn, W. Inhomogeneous electron gas. *Physical Review*, v. 136, p. B864–B871, 1964.
- 4.- Kohn, W.; Shanm, L. J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects. *Physical Review*, v. 140, p. A1133–A1138, 1965.
- 5.- Ziman, J. M. *Principles of the Theory of Solids*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1972.
- 6.-IRENA – International Renewable Energy Agency (2023). *Renewable Energy Market Analysis: Latin America*. Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications>
- 7.-Hanwei Teng., Shujian Li., Zheng Cao., Shuang Li., Changping Li., Tae Jo Ko., Carbon Fiber Composites for Large-Scale Wind Turbine Blades: Applicability Study and Comprehensive Evaluation in China., *J. Mar. Sci. Eng.*2023,11(3), 624; <https://doi.org/10.3390/jmse11030624>
- 8.-Ashby, M.F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design* (4th ed.). Elsevier.
- 9.-Guwei Shen., Xiaolin Chen., Jie Yan., Longyi Fan., Zhou Yang., Jin Zhang., Renguo Guan., A Review of Progress in the Study of Al-Mg-Zn(-Cu) Wrought Alloys., *Metals* 2023, 13(2), 345; <https://doi.org/10.3390/met13020345>
- 10.-Curtarolo, S., Setyawan, W., Wang, S., et al. (2012). *AFLOWLIB.org: A distributed materials properties repository from high-throughput ab initio calculations*. *Computational Materials Science*, 58, 227–23. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.002>
- 11.-Kittel, C. (2005). *Introduction to Solid State Physics* (8th ed.). Wiley. Capítulos sobre energía de enlace y estructuras cristalinas.
- 12.-Ceder, G., & Jain, A. (2013). *Designing materials for energy storage and conversion using ab initio simulations*. *MRS Bulletin*, 38(9), 743–750., <https://doi.org/10.1557/mrs.2013.194>
- 13.-Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design* (4th ed.). Elsevier
- 14.-David Blanco., Eva María Rubio., Raquel María Lorente-Pedreille., María Ana Sáenz-Nuñoz., *Lightweight Structural Materials in Open Access: Latest Trends*., *Materials*2021,14(21), 6577; <https://doi.org/10.3390/ma14216577>
- 15.-Brøndsted, Povl; Mikkelsen, Lars Pilgaard., *Challenges Testing Composite Materials for Wind Turbine Blades*., [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/12629743/Workshop\\_Proceedings\\_24\\_10.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/12629743/Workshop_Proceedings_24_10.pdf)
- 16.-Kittel, C. (2005). *Introduction to Solid State Physics* (8th ed.). Wiley. Capítulos sobre bandas electrónicas, nivel de Fermi y Densidad de Estados. Referencia clásica para describir s, p, d y EF.
- 17.-Ashcroft, N. W., & Mermin, N. D. (1976). *Solid State Physics*. Holt, Rinehart and Winston.
- 18.-Pettifor, D. G. (1995). *Bonding and Structure of Molecules and Solids*. Oxford University Press.
- 19.-Liu, Z. K. (2015). *First-principles calculations for the thermodynamics of alloys: A brief review*. *CALPHAD*, 51, 116–121.. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2015.10.002>

- 20.-[He Pan.](#), Development and Application of Lightweight High-strength Metal Materials., January 2018., [MATEC Web of Conferences](#) 207(6):03010,m  
DOI:[10.1051/mateconf/201820703010](https://doi.org/10.1051/mateconf/201820703010)
- 21.-Gao, M. C., Yeh, J. W., Liaw, P. K., & Zhang, Y. (Eds.). (2016). *High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications*. Springer.
- 22.-Bradley A., Newcomb, Han G. Chae., The properties of carbon fibers: [Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres \(Second Edition\)](#)., The Textile Institute Book Series., 2018, Pages 841-871., <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101272-7.00021-3>.
- 23.- Vaishnav M., Divyansh S., Chadhaa. U. , Aravind Raj. S. , Hameed Sultanb. M. T., Shahard. F. S., Shahd. A. U- M., A review on metal additive manufacturing for intricately shaped aerospace componentes., *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*., [Volume 39](#), November 2022, Pages 18-36., <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.07.005>
- 24.- Mitsubishi Chemical – *Performance of Carbon Fiber & Carbon Fiber Reinforced Plastics* [https://www.m-chemical.co.jp/carbon-fiber/en/about/performance/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.m-chemical.co.jp/carbon-fiber/en/about/performance/?utm_source=chatgpt.com)
- 25.- S V Satya Prasada , S B Prasada , Kartikey Verma b , Raghvendra Kumar Mishrac , Vikas Kumar d , Subhash Singh., The role and significance of Magnesium in modern day research- A review.,  
<https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.05.012>.,<https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.05.012>
- 26.- **Editor:** R. Boyer, E.W. Collings, and G. Welsch., *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*., ISBN: 978-0-87170-481-8., [https://www.asminternational.org/results/-/journal\\_content/56/06005G/PUBLICATION/](https://www.asminternational.org/results/-/journal_content/56/06005G/PUBLICATION/)
- 27.- J. R. Davis (Ed.). (1999). **Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys**. ASM International./