

# **Avaliação de Ambientes 3D dentro do mercado de energia eólica**

Thiago Costa Amaral  
Universidade de São Paulo  
Dez/2023

## **Resumo**

Este documento buscou realizar uma revisão sistemática ao identificar a perspectiva de crescimento contínuo que o mercado eólico vem apresentando nos últimos anos. O aumento das demandas por eficiência operacional e otimização de processos sugere uma crescente aceitação e integração de tecnologias como Realidade Virtual e Realidade Aumentada no cenário industrial, impulsionando ainda mais a pesquisa nesse domínio.

Pode-se observar durante o estudo um foco recente nas áreas relacionadas operação de parques eólicos, onde busca-se auxiliar os profissionais de campo com treinamentos e suporte em tempo real. Tal foco parece ser diretamente relacionado a possibilidade de ganhos nessa área, que, por terem um caráter mais palpável, podem gerar maiores ganhos ao serem simulados em ambientes imersivos e interativos.

A revisão também identificou uma lacuna significativa na validação prática dessas tecnologias com usuários reais. Embora muitos estudos destaquem a aplicabilidade potencial de Ambientes Virtuais, a implementação e a validação prática com profissionais do setor eólico permanecem limitadas, apresentando uma possível barreira à generalização e aceitação dessas tecnologias no ambiente de trabalho.

A multiplicidade de temas abordados e as variações nas metodologias de pesquisa podem dificultar uma síntese unificada dos resultados, destacando a necessidade de uma maior consolidação e padronização nas abordagens metodológicas para permitir comparações mais robustas entre os estudos. Este cenário ressalta a importância de futuras pesquisas focadas na validação prática, para que os Ambientes Virtuais possam desempenhar um papel eficaz na transformação desse setor.

## 1. Introdução

Nos últimos anos, a indústria eólica tem testemunhado um crescimento significativo em capacidade instalada e projetos em desenvolvimento. Grande parte desta realidade é diretamente relacionada ao avanço do desejo mundial por descarbonização e encontro das metas de “net zero”. Como a fonte eólica é renovável e possui preços competitivos, entende-se que tal fonte pode ser parte da solução para o alcance das metas ambientais estipuladas (GWEC, 2023). A Figura 1 lustra o crescimento do setor nos últimos anos.

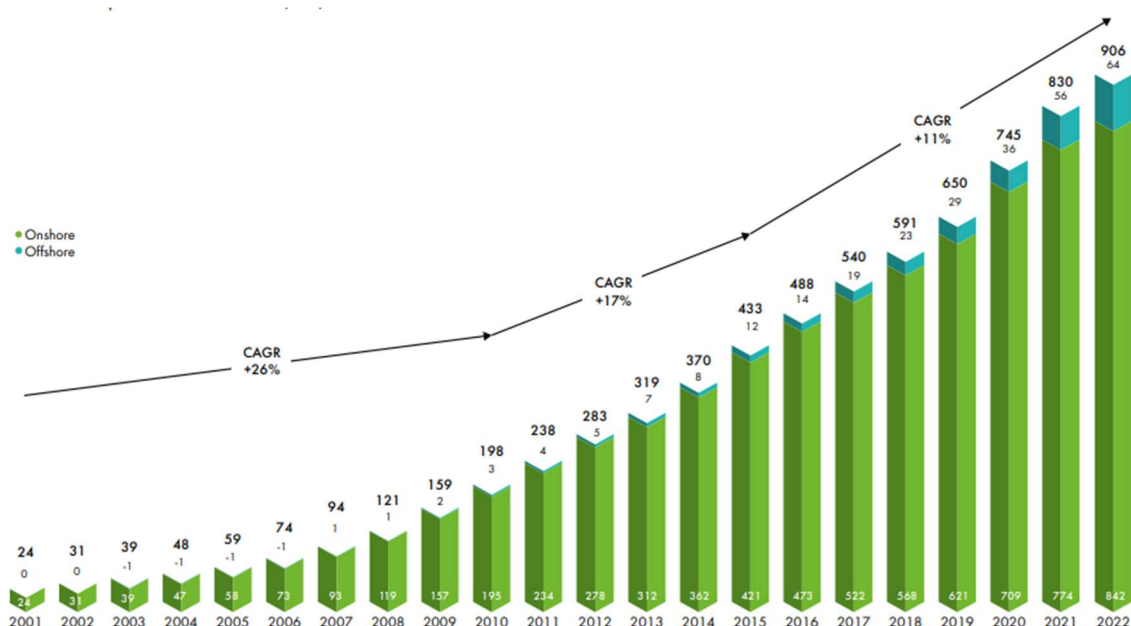


Figura 1 – Crescimento do setor eólico mundial em GW (GWEC, 2023)|

Para enfrentar os problemas consequentes da rápida expansão do mercado eólico, profissionais do setor começaram a procurar inovações que possibilitassem a otimização de resultados. Entre essas inovações, os Ambientes Virtuais (VR - Realidade Virtual e AR - Realidade Aumentada) emergiram como potenciais impulsionadores de transformações em diversas áreas do setor eólico. Esta revisão sistemática visa explorar o impacto dessas tecnologias no mercado eólico, com foco nas áreas de comunicação, administração e operação.

O cenário desafiador da indústria eólica, caracterizado por demandas crescentes por eficiência operacional, segurança, redução de custos e aprovação social, motivou a exploração de novas soluções para estes problemas. Nesse contexto, a Realidade Virtual e a Realidade Aumentada surgem como potenciais ferramentas para abordar desafios

operacionais e administrativos de profissionais do setor, além de possibilitar a melhor interação entre a sociedade e a nova tecnologia.

Ao delinear as fronteiras da pesquisa existente, esta revisão busca proporcionar uma compreensão abrangente das implicações que Ambientes Virtuais Tridimensionais apresentam desde as etapas iniciais de comunicação até as fases cruciais de pré-operação e pós-operação. A contextualização destes avanços é essencial não apenas para os pesquisadores interessados no tema, mas também para os profissionais e gestores da indústria eólica que buscam estratégias inovadoras para enfrentar os desafios que tais projetos apresentam.

Portanto, ao analisar estudos consolidados em revistas renomadas, esta revisão sistemática visa fornecer noções do estado atual do uso de Ambientes Virtuais do mercado eólico, identificando lacunas de pesquisa e delineando direções promissoras para investigações futuras.

## 2. Metodologia

O objetivo desta secção é o exibir a metodologia que foi aplicada para a elaboração deste trabalho. Os itens a seguir definem os principais temas que foram utilizados como base para o protocolo de revisão sistemática deste estudo.

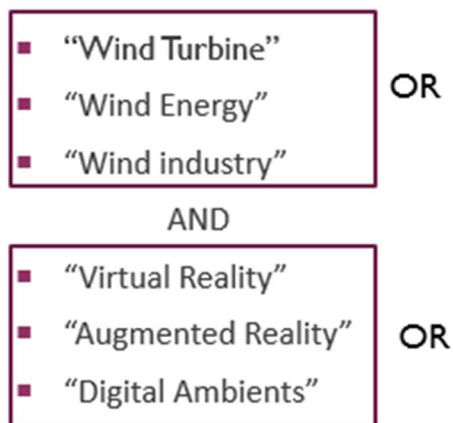
### a. Definição de fontes

A seleção dos estudos incluídos nesta revisão sistemática foi realizada com base em diretrizes específicas para garantir a relevância e a qualidade da pesquisa analisada. A busca abrangente foi conduzida em bases de dados eletrônicas relevantes, como:

- IEEE
- Google Scholar
- Elsevier
- IOPscience
- Web of Science

É importante ressaltar que diversas fontes foram utilizadas pelo fato do campo de energia renovável ainda não ser amplamente estudado em conjunto com ambientes virtuais tridimensionais, o que forçou o estudo a expandir o número de fontes utilizadas.

Para os campos de pesquisa, foram utilizados termos adequados ao tema na seguinte configuração:



## **b. Critérios de inclusão e exclusão**

Os critérios de inclusão foram rigorosamente aplicados para garantir a seleção de estudos alinhados aos objetivos desta revisão.

Foram incluídos artigos que:

- Investiguem o uso de ambientes virtuais tridimensionais no setor eólico
- Relatam impactos relacionados a comunicação, administração ou operação de projetos eólicos
- Estejam escritos em português ou inglês
- Publicados nos últimos 10 anos

Os critérios de exclusão, por sua vez, foram aplicados em artigos que:

- Não abordem temas de ambientes virtuais tridimensionais no setor eólico ou impactos relacionados a comunicação, administração e operação.
- Não estejam escritos em inglês e português
- Publicados antes dos últimos 10 anos

## **c. Processo de Seleção**

O processo de seleção dos estudos foi conduzido em duas fases distintas. Na primeira fase, os títulos e resumos foram avaliados para determinar a adequação inicial dos estudos. Na segunda fase, os artigos selecionados na etapa anterior foram submetidos a uma análise mais detalhada, considerando os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos.

## **d. Avaliação de Qualidade**

A qualidade metodológica dos estudos incluídos foi avaliada utilizando critérios subjetivos baseados nas referências informadas por cada artigo. Infelizmente, grande

parte dos artigos encontrados neste trabalho não apresentaram metodologias de validação com usuário, sendo a maioria puramente teóricos.

### **e. Análise dos Dados**

Os dados extraídos dos estudos incluídos foram organizados e sintetizados de maneira sistemática. As informações relevantes sobre as características do estudo, tipo de tecnologia, objetivos e resultados foram tabuladas para facilitar a compreensão e a análise comparativa.

### 3. Ambientes Virtuais tridimensionais no Mercado Eólico: Uma Visão Geral

Ambientes Virtuais, abrangendo tanto a Realidade Virtual quanto a Realidade Aumentada, oferecem experiências que podem reproduzir com significativa imersão e fidelidade cenários encontrados em situações reais. Na indústria eólica, essas tecnologias têm sido aplicadas para criar simulações envolventes, transformar a visualização de dados complexos e aprimorar a interação entre profissionais eólicos e as estruturas operacionais.

Ao avaliar os artigos encontrados nas bases de dados eletrônicas, percebeu-se uma gama muito abrangente de temas de estudos dentro do setor eólico. Os estudos variam desde o treinamento de operários para manutenção de máquina rolante até a educação de parcelas da sociedade sobre funcionamento das estruturas eólica.

Com o intuito de segregar melhor os trabalhos encontrados, dividiu-se os temas em algumas grandes áreas, sendo elas:

- **Comunicação:** Artigos que buscaram trazer algum tipo de informação do setor para uma parcela do público geral da sociedade. Tais artigos não buscam auxiliar diretamente profissionais do setor eólico.
- **Administração:** Artigos que buscaram auxiliar em atividades de profissionais mais administrativos. Tais atividades geralmente tendem a impactar mais na fase anterior a operação, na qual os profissionais devem avaliar os riscos de projeto e trabalhar com diversas áreas.
- **Operação:** Artigos que buscam auxiliar na operação de projetos eólicos. Tais artigos podem tanto estudar métodos para auxiliar a manutenção em tempo real, como auxiliar em treinamentos e capacitação de profissionais.

Com base nessas segregações os estudos foram separados e analisados de forma conjunta, no intuito de definir melhor as tendencias existentes para a aplicação de ambientes virtuais tridimensionais dentro do setor eólico.



## 4. Resultados

Conforme mencionado no item anterior, os artigos foram separados em grandes áreas para auxiliar na avaliação do tema. Os subitens abaixo descrevem um pouco dos impactos dentro de cada segregação.

### a. Impacto na Comunicação

Após realizar a metodologia mencionada anteriormente, os artigos encontrados dentro da área de comunicação foram:

| <i>Artigo</i>  | <i>Referência</i>                       |
|--|---|
| A Technical and Operational Perspective on Quality Analysis of Stitching Images with Multi-Row Panorama and Multimedia Sources for Visualizing the Tourism Site of Onshore Wind Farm | (Lai, Tsai, Chang, & Huang, 2022)       |
| A Cloud Enabled Virtual Reality Based Pedagogical Ecosystem for Wind Energy Education  | (Abichandani, Fligor, & Fromm, 2014)    |
| Augmented reality proves to be a breakthrough in environmental education   | (Education, 2015)                       |
| Worth a thousand words: Presenting wind turbines in virtual reality reveals new opportunities for social acceptance and visualization research                                       | (Cranmera, Ericsona, & Broughelb, 2020) |
| 3D augmented reality for improving social acceptance and public participation in wind farms planning   | (Platz, 2016)                           |
| Immersion matters: The medium is the message for wind energy   | (Ericsona, Broughelb, & Dharni, 2022)   |
| Seeing clearly in a virtual reality: Tourist reactions to an offshore wind project   | (Teisl, Noblet, Corey, & Giudice, 2018) |
| Coastal landscape preference of residents and tourists according to the physical attributes and viewpoints of offshore wind farms as seen through virtual reality                    | (Moona, Jiku, & Kim, 2023)              |

Analisando os artigos encontrados é interessante notar que os artigos estão concentrados em duas áreas principais. A primeira sendo focada para a educação, na qual o objetivo principal acaba sendo o de apresentar a tecnologia de forma imersiva e amigável. A segunda área por sua vez foca mais na apresentação, no qual o objetivo acaba sendo o de ilustrar de maneira fidedigna os impactos ambientais e visuais das turbinas eólicas.

Recentemente começou a surgir na Europa movimentos contrários a instalação de turbinas eólicas onshore e offshore, principalmente em função dos problemas sociais causados por elas. Dentre os problemas existentes, destaca-se para este trabalho o impacto visual das estruturas, a qual é considerada por alguns uma violação da identidade visual de um determinado local. Em função disto, muitos dos artigos buscaram trazer representações virtuais dos ambientes para tentar convencer o público geral a aceitar a implementação das estruturas eólicas.

As Figuras abaixo ilustram o resultado de alguns desses artigos.



Figura 2 – Ambiente 3D para visualização ambiental de um parque eólico (Platz, 2016).



Figura 3 – Ambiente 3D para visualização de parque eólico offshore (Teisl, Noblet, Corey, & Giudice, 2018)

## b. Impacto na Administração

Os artigos identificados que abordam temas que caem dentro de áreas administrativas do setor eólico foram:

| <i>Artigo</i>  | <i>Referencia</i>                                  |
|--|--|
| Visibility analysis and visibility software for the optimization of wind farm design   | (Machado, Otero, Arias, Bruschi, & Cendrero, 2013) |
| Developing a GIS-Based Visual-Acoustic 3D Simulation for Wind Farm Assessment  | (Manyoky, Hayek, Pieren, & Regamey, 2014)          |
| Using collaborative virtual environments to plan wind energy installations   | (Bishop & Stock, 2020)                             |
| Use of Augmented Reality Methods to Support Legal Conflicts in the Planning Process for Wind Turbines Using the Example of the Landscape Conservation Area “Eulenkopf and Surroundings | (Wundsam & Henninger, 2014)                        |

Dentro da área administrativa os tópicos de estudo são bem gerais, não existindo um padrão bem definido. Isso ocorre no momento em que cada artigo busca solucionar um problema diferente, tentando facilitar a visualização de algum impacto ou resolução de algum problema.



Figura 4 – Software desenvolvido para identificação do impacto visual de turbinas (Bishop & Stock, 2020)

### c. Impacto na Operação

Por fim, os artigos identificados dentro da área de operação podem ser visualizados na tabela abaixo. É interessante notar que tal tema teve uma quantidade maior de artigos encontrados como base.

| <i><b>Artigo</b></i>  | <i><b>Referencia</b></i>                      |
|---|---|
| Symbiotic System of Systems Design for Safe and Resilient Autonomous Robotics in Offshore Wind Farms                      | (Mitchell, Blanche, & Zaki, 2021)             |
| Using augmented reality to reduce workload in offshore environments   | (Maibach, Jones, & Walko, 2022)               |
| Augmented Reality in Maintenance: An information-centred design framework   | (Amo, Ahmet, Roy, & Widing, 2018)             |
| Digital Assistance in the Maintenance of Offshore Wind Parks  | (Eggert, Stepputat, & Fluegge, 2020)          |
| Fully digital wind farm monitoring and inspection system based on AR augmented reality technology                         | (Xing, 2019)                                  |
| General Requirements for Industrial Augmented Reality Applications  | (Quandt, Knoke, & Gorldt, 2018)               |
| Using an Industry-ready AR HMD on a Real Maintenance Task: AR Benefits Performance on Certain Task Steps More Than Others | (Pringle & Campbell, 2018)                    |
| Industrial Augmented Reality: Requirements for an Augmented Reality Maintenance Worker Support System                     | (Lorenz, Knopp, & Klimant, 2018)              |
| Predictive digital twin for ofshore wind farms  | (Haghshenas, Hasan, Osen, & Mikalsen, 2023)   |
| Immersive Virtual Reality Training : Three Cases from the Danish Industry   | (Radhakrishnan, Chinello, & Koumaditis, 2021) |

Os artigos encontrados para a área de operação buscaram trazer formas de auxiliar a manutenção e operação das estruturas encontradas em parques eólicos. Muitos estudos buscaram trazer formas de treinar as equipes para garantir uma eficiência maior dos operadores, como é o caso de (Pringle & Campbell, 2018), que buscou com a utilização de realidade aumentada trazer um ambiente virtual de treinamento. Tal ambiente é representado na Figura 5.



Figura 5 – Treinamento com AR para manutenção de motores (Pringle & Campbell, 2018)

Além de treinamentos, a área de operação também apresentou artigos que buscaram trazer formas de otimizar a operação em tempo real do parque. Tais artigos geralmente focam em utilizar as ferramentas de visualização virtual 3D para auxiliar a conclusão mais rápida de uma tarefa ou identificação mais precisa de uma anomalia. A Figura 6 traz um exemplo de monitoramento de uma usina offshore sendo realizada em tempo real.

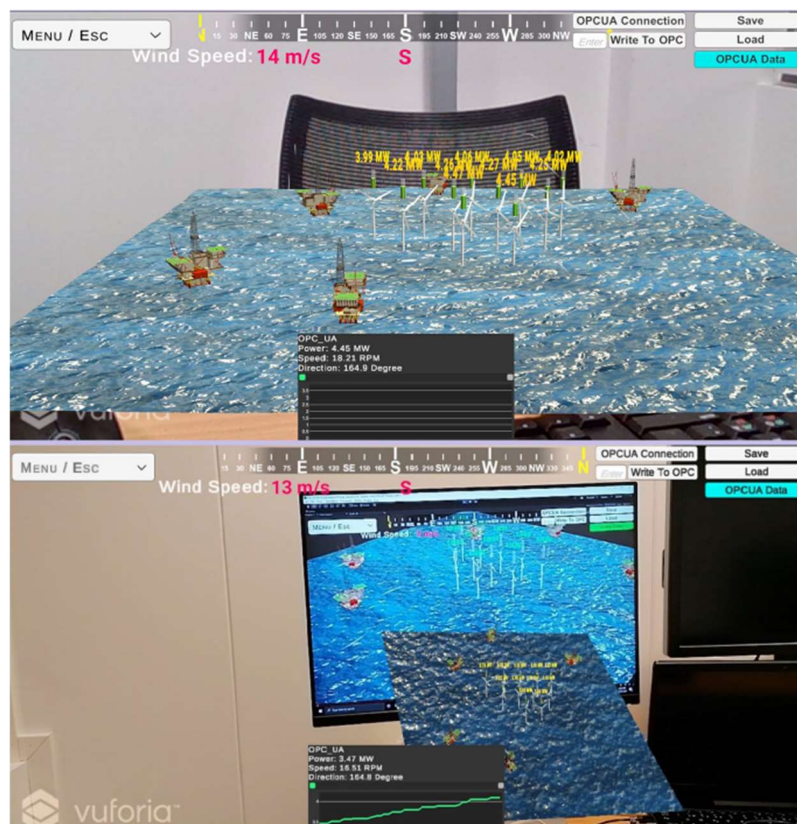


Figura 6 – Digital Twin para auxiliar monitoramento de ativos (Haghshenas, Hasan, Osen, & Mikalsen, 2023)

## 5. Tendencias e desafios

O campo de pesquisa referente ao impacto causado por de Ambientes Virtuais Tridimensionais no mercado eólico tem experimentado um notável crescimento nos últimos anos, evidenciado pelo aumento no número de artigos, especialmente na área de operação. A Figura 7 representa esse crescimento.

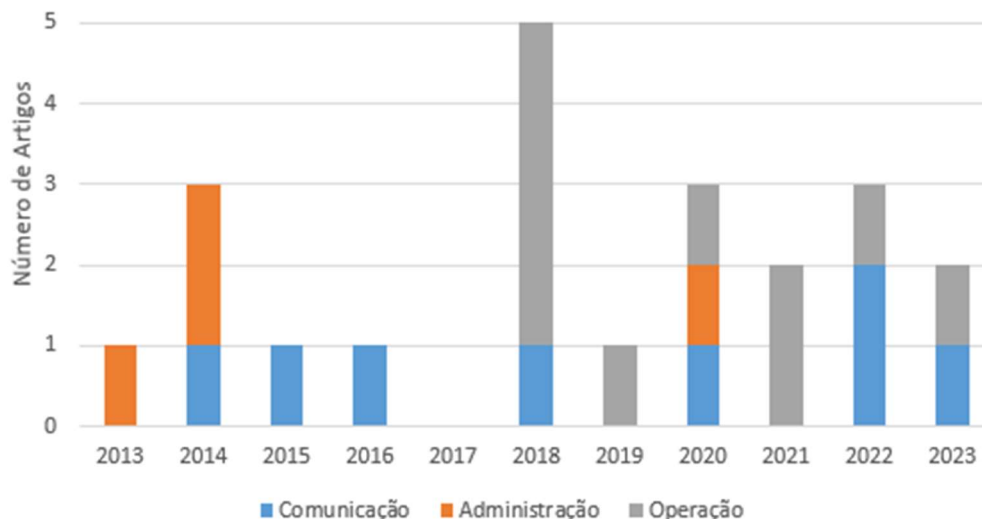
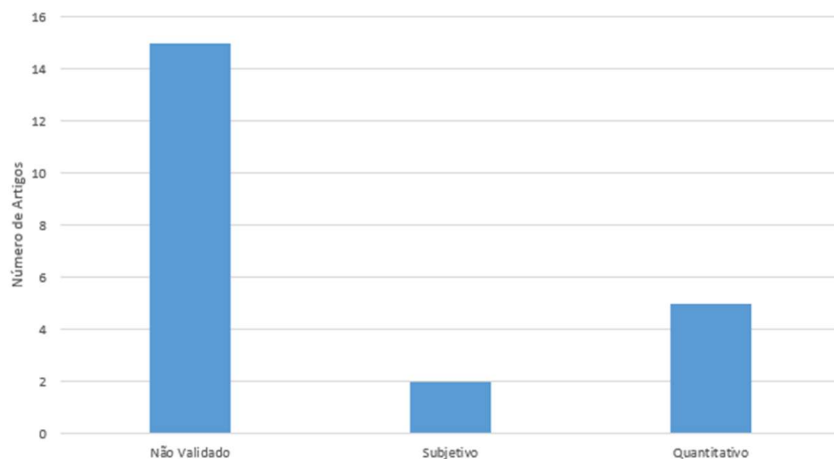


Figura 7 – Quantidade de artigos por ano

Esta tendência reflete o interesse crescente dos pesquisadores em explorar as potencialidades dessas tecnologias imersivas em contextos operacionais específicos da indústria eólica. É interessante notar também o crescimento da artigos relacionados a operação nos últimos anos e a queda de artigos relacionados a administração. Observando os artigos, pode-se perceber que os trabalhos voltados a área administrativa tiveram pouco uso real, uma vez que as ferramentas de Realidade Virtual e Realidade Aumentada foram quase em sua totalidade utilizadas para suprir demandas que não existem e que já são bem cobertas em outros softwares.

Apesar do aumento da produção de conhecimento, é observada uma lacuna substancial na validação prática dessas tecnologias com usuários reais. Muitos estudos destacam a aplicabilidade potencial de Ambientes Virtuais, porém a implementação e a validação prática com profissionais do setor eólico permanecem limitadas. Esta falta de validação prática pode impactar a generalização e a aceitação dessas tecnologias no ambiente de trabalho. A Figura a seguir ilustra a quantidade dos artigos apresentados que foram validados e se foram validados de forma subjetiva ou não.



Conforme visto em (GWEC, 2023), espera-se um crescimento contínuo do mercado eólico. As crescentes demandas por eficiência operacional, treinamento avançado e monitoramento remoto sugerem uma aceitação e uma integração cada vez maiores dessas tecnologias no cenário industrial. Esse crescimento, por sua vez, impulsionará ainda mais as pesquisas nesse domínio.

Contudo, à medida que o campo se expande, torna-se evidente a dispersão temática e a divergência nas abordagens metodológicas adotadas nos estudos existentes. A multiplicidade de temas abordados e as variações nas metodologias de pesquisa podem dificultar uma síntese unificada dos resultados. Isso destaca a necessidade de uma maior consolidação e padronização nas abordagens metodológicas para permitir comparações mais robustas entre os estudos.

## 6. Conclusões

Na medida que exploramos o panorama atual da utilização de Ambientes Virtuais no mercado eólico, pode-se perceber o interesse por entender e validar essas tecnologias. No entanto, é crucial reconhecer que, apesar do aumento notável no número de estudos e da diversidade de aplicações propostas, a validação prática e a integração efetiva no setor eólico ainda permanecem em estágios iniciais.

A busca por otimização de parques offshore pode atuar como poderoso motor para a adoção mais ampla dessas tecnologias. A natureza complexa e remota das operações offshore ressaltam a necessidade de soluções inovadoras que possam ser facilitadas por Ambientes Virtuais. O desejo de aprimorar a eficiência, a segurança e a manutenção de parques eólicos em alto-mar pode ser um catalisador significativo para a implementação mais extensiva dessas tecnologias.

Uma análise crítica dos estudos revisados revela uma predominância de pesquisas carentes de validação quantitativa robusta. Embora muitos artigos destaquem os benefícios potenciais, a falta de validação prática com dados quantitativos impacta a generalização e a confiabilidade das conclusões. Esta lacuna destaca a necessidade premente de futuras pesquisas se concentrarem não apenas nas possibilidades conceituais, mas também na coleta de evidências concretas por meio de estudos empíricos bem fundamentados.

O próximo estágio de desenvolvimento exige uma abordagem mais focada na validação, na maturidade tecnológica e na adaptação às nuances específicas da indústria eólica. Somente assim essas tecnologias poderão verdadeiramente transformar e otimizar as operações eólicas para enfrentar os desafios futuros de maneira eficaz.



## Referências

- Abichandani, P., Fligor, W., & Fromm, E. (2014). *A Cloud Enabled Virtual Reality Based Pedagogical Ecosystem for Wind Energy Education*. Electrical and Computer Engineering Department, Drexel University.
- Amo, I., Ahmet, J., Roy, R., & Widing, S. (2018). Augmented Reality in Maintenance: An information-centred design framework. (pp. 148-155). Bremen: Procedia Manufacturing.
- Bishop, I., & Stock, C. (2020). Using collaborative virtual environments to plan wind energy installations. *Renewable Energy*, 2348-2355.
- Cranmera, A., Ericsona, J. D., & Broughelb, A. (2020). Worth a thousand words: Presenting wind turbines in virtual reality reveals. *Energy Research & Social Science*.
- Education, R. C. (2015). Augmented reality proves to be a breakthrough in enviromental education. *Protection and restoration of the environment XIV*. Greece.
- Eggert, M., Stepputat, M., & Fluegge, W. (2020). Digital Assistance in the Maintenance of Offshore Wind Parks. *EERA DeepWind*.
- Ericsona, J. D., Broughelb, A., & Dharni, K. (2022). Immersion matters: The medium is the message for wind energy. *Journal of Cleaner Production*.
- GWEC. (2023). *Global Wind Report 2023*. GWEC.
- Haghshenas, A., Hasan, A., Osen, O., & Mikalsen, E. (2023). Predictive digital twin for offshore wind. *Energy Informatics*.
- Immersion matters: The medium is the message for wind energy . (2022). *Journal of Cleaner Production*.
- Lai, J.-S., Tsai, Y.-H., Chang, M.-j., & Huang, J.-Y. (2022). A Technical and Operational Perspective on Quality Analysis of Stitching Images with Multi-Row Panorama and Multimedia Sources for Visualizing the Tourism Site of Onshore Wind Farm. *International Journal of Geo-Information*.
- Lorenz, M., Knopp, S., & Klimant, P. (2018). Industrial Augmented Reality: Requirements for an Augmented Reality Maintenance Worker Support System. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct.
- Machado, C., Otero, C., Arias, R., Bruschi, V., & Cendrero, A. (2013). Visibility analysis and visibility software for the optimisation of wind. *Renewable Energy*, 388-401.
- Maibach, M., Jones, M., & Walko, C. (2022). Using augmented reality to reduce workload in offshore environments. *CEAS Aeronautical Journal*, 559-573.

- Manyoky, M., Hayek, U., Pieren, R., & Regamey, A. (2014). Developing a GIS-Based Visual-Acoustic 3D Simulation for Wind Farm Assessment. *International Journal of Geo-Information*, 29-48.
- Mitchell, D., Blanche, J., & Zaki, O. (2021). *Symbiotic System of Systems Design for Safe*. IEEE RELIABILITY SOCIETY SECTION.
- Moona, T., Jiku, L., & Kim, M. (2023). Coastal landscape preference of residents and tourists according to the physical attributes and viewpoints of offshore wind farms as seen through virtual reality. *Regional Studies in Marine Science*.
- Platz, S. (2016). 3D augmented reality for improving social acceptance and public participation in wind farms. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Pringle, A., & Campbell, A. (2018). Using an Industry-ready AR HMD on a Real Maintenance Task: AR Benefits Performance on Certain Task Steps More Than Others. *International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct*.
- Quandt, M., Knoke, B., & Gorltdt, C. (2018). General Requirements for Industrial Augmented Reality Applications. *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems* (pp. 1130–1135). CIRP.
- Radhakrishnan, U., Chinello, F., & Koumaditis, K. (2021). Immersive Virtual Reality Training : Three Cases from the Danish Industry. *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops*.
- Teisl, M., Noblet, C., Corey, R., & Giudice, N. (2018). Seeing clearly in a virtual reality: Tourist reactions to an offshore wind project. *Energy Policy*, 601-611.
- Wundsam, T., & Henninger, S. (2014). Use of Augmented Reality Methods to Support Legal Conflicts in the Planning Process for Wind Turbines Using the Example of the Landscape Conservation Area “Eulenkopf and Surroundings. *Energy and Power Engineering*, 349-361.
- Xing, X. (2019). Fully digital wind farm monitoring and inspection system based on AR augmented reality. *ESMA, Earth and Environmental Science*.