



INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, ROBÓTICA E O DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE

SUMÁRIO EXECUTIVO DE LIVRO

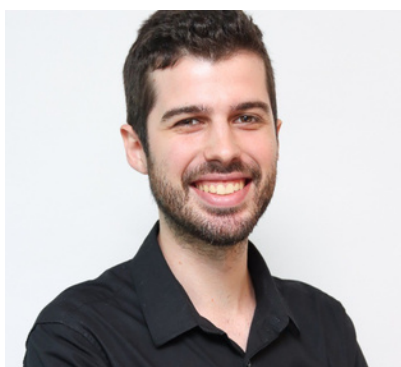
MATHEUS NORONHA | MATHEUS DE PAULA | UIARA VALENTE

AUTORES



MATHEUS NORONHA

Head de Energia Eólica Offshore na ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias. Doutor e Pós Doc em Estratégia e Inovação de Tecnologias Limpas. Autor dos livros “Inovação e Sustentabilidade para a Transição Energética”, “The Strategies and Innovations of Cleantech Organizations” e “Diário de um Pesquisador – Apoiando a Trajetória Acadêmica.”



MATHEUS DE PAULA

Analista de Assuntos Regulatórios na Casa dos Ventos. Especialista em Energias Renováveis pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Engenheiro de Energia com honras pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). Seus interesses acadêmicos e profissionais incluem as áreas de Regulação de Energia, Ciência de Dados e Inovação.



UIARA VALENTE

Engenheira na Petrobras. Mestre em “Data Analytics & Decision Science” pela RWTH Aachen University (Alemanha), com a pesquisa científica “Global Offshore Wind Energy Growth and the Role of Artificial Intelligence”, possui MBA e é certificada PMP. Sua trajetória profissional inclui experiências significativas nas empresas de energia alemãs Uniper e EnBW. Motiva-se pelo envolvimento em iniciativas voltadas para energias renováveis e parcerias estratégicas.

Minibio
AUTORES

DISCLAIMER

Esta publicação e os dados e informações aqui contidos são fornecidos da maneira que estão apresentados. Todas as precauções razoáveis foram tomadas pelos autores-realizadores para verificar a confiabilidade do material e dados desta publicação.

No entanto, os autores não fornecem garantia de qualquer tipo, expressa ou implícita, e não aceitam responsabilidades por qualquer consequência do uso da publicação ou material aqui contido.

A menção de determinadas empresas ou determinados projetos ou produtos não implica que sejam endossados ou recomendados preferencialmente pelos autores.

As designações e utilizações empregadas e a apresentação do material aqui não implica a expressão de qualquer opinião por parte dos autores sobre o estatuto jurídico de qualquer região, país, território, cidade ou área ou das suas autoridades.

O sumário executivo apresentado é referente ao livro *"Inteligência Artificial, Robótica e o Desenvolvimento da Eólica Offshore"* produzido pelos autores Matheus Noronha, Matheus de Paula e Uiara Valente. O material é uma compilação da obra completa que será publicado oficialmente no segundo semestre do ano de 2025.

A concepção das imagens e artes que compõem o layout do sumário executivo foram geradas a partir de Inteligência Artificial via ChatGPT 4.0 e editadas no programa Canva.



DISCLAIMER

Prefácio do livro

PALAVRA DO LEITOR



ELBIA GANNOUM

A jornada para a Transição Energética é uma trajetória contínua e que conta com as fontes de energia limpa capazes de escalar sua capacidade instalada nos próximos anos. Dentre essas tecnologias existentes, as eólicas offshore poderão ser aliadas no combate às mudanças climáticas, desbravando novos rumos para a industrialização da economia de baixo carbono e evitando que o mundo ultrapasse os limites do Netzero.

Os rumos a serem traçados vão muito além da implementação de novas fontes de energia limpa como as eólicas offshore, e percorrem a utilização de estratégias que devem considerar tecnologias como inteligência artificial, robótica, digital twins e internet das coisas. A utilização dessas tecnologias irão contribuir diretamente para o desenvolvimento industrial e econômico dos próximos anos, revolucionando os sistemas econômicos convencionais com a capacidade de garantir um futuro limpo, renovável e socialmente inclusivo.

A conjuntura das eólicas offshore abarca uma nova oportunidade para experimentar a evolução de tecnologias que em conjunto apresentam o potencial de reduzir impactos ao meio ambiente e sociedade. As inovações que envolvem a tecnologia podem auxiliar na preservação de espécies, assertividade no desenvolvimento de projetos, geração de novos tipos de empregos até a mitigação de conflitos sociais.

Acelerar o desenvolvimento da energia eólica offshore em diversas regiões do mundo é uma sinergia da indústria 4.0 e inovações disruptivas que irão colaborar com fatores críticos para essa fonte renovável. Alguns desses fatores são: emissão de licenças, mecanismos regulatórios transparentes, capacitação, prazos de entregas de documentos, bancos de dados e incentivo a pesquisa e até mesmo alinhamento na utilização e uso das regiões marítimas. Esses fatores já são reconhecidos em diversos mercados e poderão ser objeto de aprimoramento com a crescente implementação da robótica e inteligência artificial.

Esse livro explora as diferentes aplicações de inteligência artificial e robótica para as eólicas offshore, evidenciando em casos existentes e teóricos como a junção dessas aplicações irá auxiliar a maturidade tecnológica da fonte e seu desenvolvimento em diversos países. Além disso, ao longo do trabalho são apresentadas alternativas que poderão ser sementes indutoras para os mercados de eólicas offshore que estão em fase de desenvolvimento e precisam colher inovações para acelerar o seu processo de estruturação.

A conexão científica, técnica e de mercado que compõem a criação deste livro tem o objetivo de incentivar e colaborar para a criação de inovações e modelos de negócios que possam auxiliar no combate às mudanças climáticas e as metas traçadas para reduzir o aumento exponencial da temperatura nos próximos anos (Netzero 2050). Deste modo, esperamos que os apreciadores da temática e leitores possam visualizar novos paradigmas e horizontes estratégicos para as eólicas offshore com as contribuições deste livro.

CEO at ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias - Vice Chair of Board at GWEC. Mother. An active voice in the global debate on diversity and economic inclusion in the energy sector. #ESG. PhD in Economics at UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina.

Prefácio
PALAVRA
DO LEITOR

TÓPICOS DO SUMÁRIO EXECUTIVO

- Tópicos do Sumário Executivo
- Introdução

- Inteligência Artificial e a Previsibilidade de Ventos
- A Robótica Subaquática
- Robótica e Inteligência Artificial: Aliados para Manutenção Preditiva
- Configuração de Turbinas Eólicas Offshore
- A Inteligência Artificial e o Monitoramento Ambiental
- Smart Grids e o Uso da IA como Suporte na Operação de Parques Eólicos
- Análise de Dados de Sensores
- Redes Neurais Artificiais
- Identificação de Padrões para Layout dos Parques Eólicos Offshore
- Inovação Tecnológica e Soluções Aeroespaciais
- Mercado de Carbono: Um Mecanismo Impulsionador
- Digital Twins e Tecnologias Inovadoras
- Aplicações de Fluidodinâmica Computacional e IA
- Inteligência Artificial, Data Centers e Caminhos para a Demanda
- Impressão 3D: um Potencial Facilitador para a Infraestrutura
- Expandindo os Horizontes e Próximos Passos

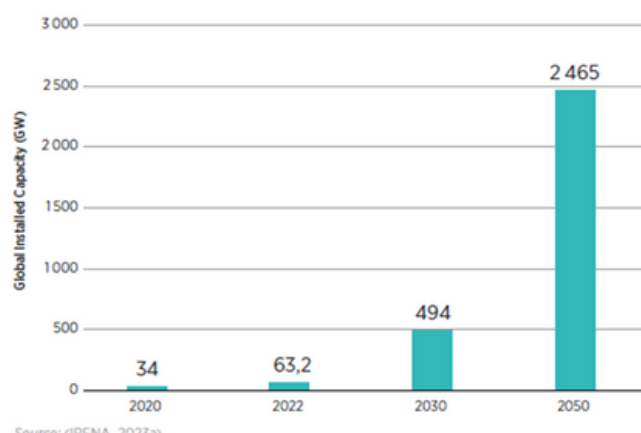
INTRODUÇÃO

As **mudanças climáticas** são um **desafio global**, manifestadas pelo **aumento da temperatura** e **eventos extremos** agravados pela emissão de gases de efeito estufa. A **Transição Energética** a partir das energias renováveis, em especial a **eólica offshore**, é crucial para reduzir a **dependência de combustíveis fósseis** e **descarbonizar** o setor elétrico. Essa fonte de energia se destaca por aproveitar ventos constantes em alto mar, aumentando a capacidade de geração elétrica.

O uso de tecnologias inovadoras, como **Inteligência Artificial (IA)** e **Robótica** poderá ser uma aliança fundamental para **acelerar essa transição**, sendo aplicável em todas as fases dos projetos. Essas ferramentas podem otimizar o desenvolvimento e a operação dos parques eólicos offshore.

Os capítulos do projeto inclinam em apresentar **estratégias para alcançar as metas do Net Zero**, e **impulsionar a redução da emissão de carbono** no processo de geração de energia com foco nos benefícios que a IA e a Robótica podem trazer para o mercado eólico offshore e para a ciência. De acordo com dados do Global Wind Energy Council (GWEC) e a International Energy Agency (IRENA) para atingir o cenário de 1,5° C da neutralidade de carbono estabelecido pelo Netzero, a eólica offshore será uma tecnologia central na discussão. Para isso serão necessários cerca de 500 GW de energia eólica offshore instalada até 2030 e 2.465 GW até 2050 (Figura 1).

Figura 1: Projeções de capacidade instalada de eólicas offshore até 2050



Fonte: IRENA e GWEC (2023) | Enabling Frameworks for Offshore Wind Scale Up

INTRODUÇÃO



INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E A PREVISIBILIDADE DE VENTOS

A **previsão de vento** é crucial para uma operação segura e eficiente dos parques eólicos offshore no âmbito do planejamento de geração de energia dos projetos. **Maior eficiência e otimização da geração, redução de custos operacionais e previsibilidade para as operações de compra e venda de energia** são alguns dos benefícios que a previsão dos ventos dos projetos podem trazer.

Nesse sentido, diversas abordagens de **Inteligência Artificial** podem ser utilizadas para que ocorra uma análise da direção, constância e da velocidade dos ventos, permitindo com que os geradores de energia atuem com eficiência.

As técnicas de **aprendizagem profunda ("Deep Learning")** e **aprendizado de máquina ("Machine Learning")** vem se destacando com distintas abordagens para a previsibilidade dos ventos. Modelos matemáticos avançados, tais como as redes neurais artificiais e técnicas de regressão não linear são comumente utilizadas nesse meio.

Basicamente, as diversas formas de realização das modelagens utilizam dados históricos meteorológicos (ex.: temperatura e umidade do ar), para a estimativa da variável de fluxo de vento em horizontes de tempo de curto prazo e até o longo prazo que permitem um planejamento adequado ao longo da operação dos parques eólicos offshore.

TRÍADE DA PREVISÃO DA VELOCIDADE DO VENTO VIA IA

Figura 2: Tríade da previsão da velocidade do vento via IA



Fonte: Autores

No âmbito da **operação dos parques eólicos** estruturas que são conhecidas como LIDARs flutuantes são responsáveis por coletar e medir a velocidade e direção dos ventos a partir de dados que, em seguida, que são calibrados posteriormente. Esses dados são processados e utilizados para a previsão de vento em horizontes futuros.

Em relação ao **planejamento e manutenção** a previsão dos momentos em que não há fluxo de vento pode ser utilizada para os possíveis períodos de manutenção, seja das estruturas ou dos aerogeradores que fazem parte do parque eólico offshore.

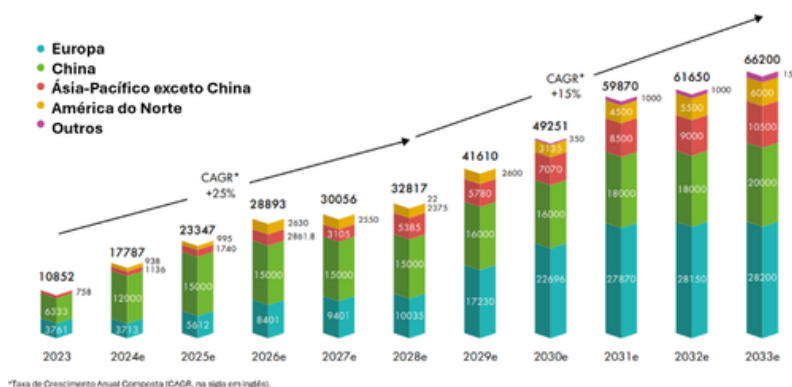
Por fim, em relação à **integração nas redes elétricas**, a previsão permite com que a integração de novos projetos seja mais eficiente para integração nas linhas de transmissão. Ou seja, com paradas programadas para eventuais manutenções na rede.

A ROBÓTICA SUBAQUÁTICA

De acordo com o Global Wind Energy Council (GWEC), a capacidade instalada global de energia eólica offshore alcançou 75 GW ao final de 2023. O GWEC projeta um crescimento médio anual (CAGR) de **25%** na **nova capacidade instalada**, com a expectativa de que a eólica offshore atinja aproximadamente 380 GW até 2030 para atender ao objetivo de limitar o aquecimento global a **1,5 °C**.

A chegada dos **sistemas robóticos autônomos** marca o início de uma nova era na indústria da energia eólica offshore, melhorando significativamente a **eficiência operacional** e a **segurança**.

Figura 3: Novas instalações de energia eólica offshore, global (MW)



Fonte: GWEC - Market Intelligence (2024)

APLICAÇÕES PRÁTICAS

Na prática, **os robôs subaquáticos** têm sido empregados com sucesso em diversos parques eólicos offshore. Um dos exemplos é o **“Centro de Apoio a Operações e Supervisão de mergulho - ROV”** da Oceânica Engenharia.

A Oceânica Engenharia conta com um Centro de Apoio a Operações que é utilizado para supervisão de operações de Mergulho, **ROV**. Contando com três sistemas independentes de videowall composto por **18 monitores de 49”**, é possível acompanhar ao vivo às mais de **1000 câmeras instaladas nas embarcações**, nos ROVs e capacetes de mergulho, através de **conexão de internet de Satélites de Baixa Órbita**, além do **posicionamento das embarcações** e de plataformas offshore. Dessa forma os profissionais mais experientes são alocados em um único local com acesso a todas as operações da empresa online, garantindo mais **segurança, eficiência** e **gestão das atividades offshore**.

Figura 4: Centro de apoio a operações e supervisão de mergulho | ROV



Fonte: Oceânica Engenharia e Consultoria (2024)

ROBÓTICA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: ALIADOS PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA

Para garantir o contínuo desenvolvimento das eólicas offshore, é necessário o aprofundamento na complexidade de engenharia que envolve a **operação e manutenção (O&M)** e fatores de inspeção, logística e manutenção. Dentre estes fatores, a manutenção preditiva tem se destacado por meio de alternativas tecnológicas que utilizam a Inteligência Artificial (IA) e a Robótica para **reduzir custos de O&M** e **antecipar possíveis manutenções** necessárias nos diversos sistemas envolvidos.

A **manutenção preditiva** trata-se da atividade de **monitoramento contínuo para identificar de forma antecipada a necessidade de possíveis reparos e manutenções**. Esse tipo de manutenção permite antecipar falhas iminentes e sinais de deterioração em estágios iniciais, viabilizando a ação de contingência estratégica para realização de processos de manutenção. O processo conta com a coleta e análise de dados de operação associados a temperatura, vibração, pressão e corrente elétrica e permite que as corporações possam **agir de forma antecipada para evitar possíveis prejuízos**.

CASO DE IA E ROBÓTICA PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA

As **UAV (Unmanned Aerial Vehicle)** são os drones que estão sendo amplamente utilizados nas inspeções por agentes treinados, já que a inspeção presencial se torna mais difícil e demorada, diante desse problema a utilização dos drones estão em alta.

Os **UAVs estão desempenhando uma função crucial no desenvolvimento de técnicas automatizadas** de manutenção preditiva para as **inspeções**, controlando as reais condições das turbinas eólicas, bem como colaborando com a segurança, eficiência e redução de custos dos serviços de O&M. Os UAVs podem ser utilizados para a inspeção das pás, nacelles, torres e todos os componentes estruturais que envolvem os parques eólicos offshore.

Figura 5: UAV Drone



Fonte: UST – Unmanned System Technology (2021)

CONFIGURAÇÃO DE TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE

A **otimização das turbinas eólicas** dos projetos eólicos offshore é uma área que as tecnologias de Inteligência Artificial (IA) podem auxiliar para a obtenção de melhores resultados. Desing das pás, orientação das pás em tempo real, controle dos ativos operacionais e a otimização de layouts são algumas das áreas em que a IA atrelada a essas aplicações pode ser utilizada.

O design de pás trata-se de uma área que busca desenvolver as pás das turbinas eólicas offshore e onshore, visando o melhor aproveitamento do recurso e da vida útil do equipamento. O uso de IA atrelado ao design de pás, busca encontrar a melhor solução que atinja o grau de eficiência estrutural e aerodinâmica dos aerogeradores. Assim, o melhor design selecionado minimiza o peso das pás sobre as estruturas das torres e permite a ampliação do desempenho em tempo real das turbinas eólicas offshore.

CASOS PRÁTICOS

Caso 1- Clusterização para o monitoramento de falhas - Agrupamento de características comuns das turbinas eólicas

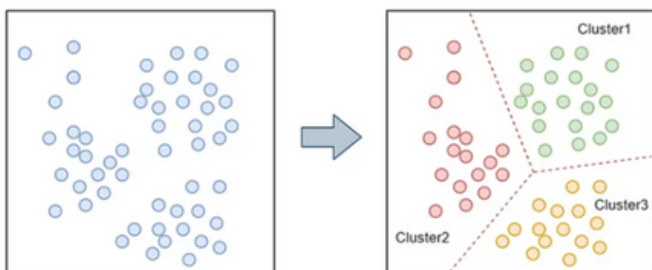


Figura 6: Clusterização e Monitoramento de Falhas
Fonte: eCloud Valley (2023)

O **controle de ativos** de energia eólica offshore refere-se ao conceito de monitorar as turbinas que estão em alto mar. Dentro desse objetivo, é possível a utilização de sensores inteligentes atrelados aos sistemas de IA que permitem, por exemplo, a avaliação e monitoramento contínuo das condições operacionais. Com essa supervisão, torna-se viável o ajuste do perfil de posicionamento das pás para um melhor aproveitamento do recurso energético.

Por fim, no que diz respeito a **otimização de layouts**, a IA auxilia para descoberta dos melhores locais para alocação dos aerogeradores a partir de diversos parâmetros como a meteorologia do local, características técnicas das turbinas entre diversos outros possíveis dependendo da modelagem. Um dos programas conhecidos para esse fim, é o **Pywake** que auxilia nos estudos e análise de dados para a otimização dos *layouts* de projetos, avaliando efeitos de esteira e a turbulência das turbinas, por exemplo.

Caso 2 - Layout otimizado de um parque eólico offshore.

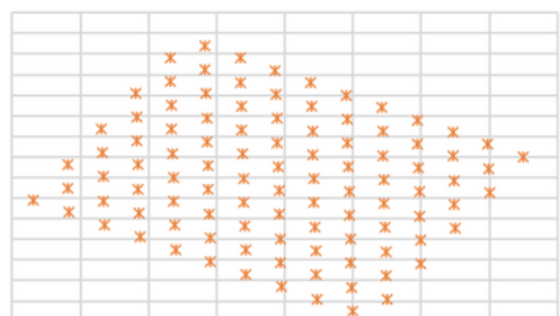


Figura 7: Layout Otimizado
Fonte: Strathgen

A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E O MONITORAMENTO AMBIENTAL

É relevante ressaltar que ao mesmo tempo que as eólicas offshore se apresentam como uma solução para escalar a descarbonização, o alinhamento entre questões ambientais e tecnologia devem ser congruentes e transparentes no processo de Transição Energética. Deste modo, diversas organizações da indústria têm fomentado a utilização de soluções de Inteligência Artificial (IA) e robótica para assegurar a conversação da vida marinha, aves e condições oceânicas que permitam a preservação de ecossistemas, ao passo que as eólicas offshore se consolidam nos mercados internacionais.

Figura 8: Inteligência Artificial nas eólicas offshore e o monitoramento de ecossistemas



Fonte: Autores

Os fatores socioambientais podem apropriar-se das tecnologias de IA existentes para auxiliar e acelerar a identificação de possíveis conflitos e oportunidades em regiões de desenvolvimento dos projetos. Neste sentido, o presente capítulo concentrou-se em apresentar casos específicos que perpassam pela utilização de soluções de IA e robótica nos eixos de: **(a) Monitoramento da vida Marinha e Oceânica; (b) Monitoramento de aves; (c) Comunidades** (Figura 8).

CASO DE MONITORAMENTO DE AVES

Um dos campos em que a IA é aplicada nas eólicas offshore trata-se do **monitoramento das aves**. Nesse meio, técnicas de **aprendizagem profunda** como as **redes neurais artificiais** são utilizadas para a **detecção em tempo real das coordenadas geográficas das aves** a sua respectiva identificação, além de sua movimentação. Essas tecnologias permitem com que ao longo da operação dos parques offshore os empreendedores **possam tomar ações antecipadas para a preservação das aves**.

Segundo estudos do RPS Group, o monitoramento de aves marinhas em parques eólicos offshore é essencial para mitigar os impactos ambientais e reduzir o risco de colisões. A IA tem emergido como uma tecnologia para **aprimorar esses sistemas de monitoramento**, proporcionando **análises mais precisas** e eficientes dos dados coletados.

SMART GRIDS E O USO DA IA COMO SUPORTE NA OPERAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS

O crescimento da capacidade instalada da energia eólica tem ampliado o escopo da transição energética em escala global. No entanto, as diferentes características de ventos em terra e em alto mar apresentam-se como um desafio para manter a estabilidade do sistema elétrico. Nesse contexto, o uso da Inteligência Artificial (IA) **surge como uma solução para otimizar a operação das redes, permitindo gerenciar de maneira mais eficiente essa variação natural.** Com isso, torna-se possível equilibrar a oferta e demanda de energia. Este capítulo explora as tecnologias de IA aplicadas na operação de parques eólicos, aprimorando a gestão das redes elétricas.

O QUE SÃO AS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES (SMART GRIDS) E COMO CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA SE BENEFICIAM?

As *Smart Grids* são **caracterizadas como uma versão modernizada das redes elétricas tradicionais.** A integração das tecnologias digitais e de comunicação avançadas junto às redes, permitem gerenciar de forma mais eficiente o transporte de energia elétrica desde uma fonte geradora (ex.: Energia Eólica Offshore) até as residências. Essa rede é chamada de inteligente porque **usa sensores, medidores e sistemas de controle e automação para monitorar o fluxo de energia elétrica em tempo real,** permitindo que a energia elétrica chegue até os consumidores sem maiores problemas.

QUAL É A DIFERENÇA ENTRE A REDE ELÉTRICA TRADICIONAL E A SMART GRID?

A principal diferença entre sistemas tradicionais e redes inteligentes está na **capacidade de troca de informações** em ambas as direções por meio da rede, **desde as concessionárias de serviços públicos até os consumidores** e vice-versa. Alguns dos principais recursos que diferenciam as redes inteligentes incluem:

- **Distribuição:** A energia gerada por prosumidores e fontes de energia renováveis podem ter caráter de variabilidade. As tecnologias de rede inteligente ajudam a coordenar, armazenar e distribuir energia dessas fontes em um fluxo estável.
- **Geração:** Funções analíticas preditivas em sistemas inteligentes significam que as tensões de alta demanda podem ser previstas e distribuídas para várias usinas e subestações. Além disso, nuvens digitais são utilizadas para gestão dos ativos.
- **Sensores:** Sensores de IoT em toda a rede podem auxiliar a detectar riscos logo no início, redistribuindo energia para diminuir interrupções e ajudar a equilibrar cargas.
- **Autoreparação e manutenção preditiva:** Sensores também podem ser usados para detectar problemas mecânicos e fazer simples solução de problemas e reparos.
- **Escolha do cliente:** Mais fornecedores de energia, cooperativas e microgeradores podem se juntar à rede.

ANÁLISE DE DADOS DE SENSORES

A indústria de energia eólica offshore, cada vez mais vital na escalada da descarbonização, tem se beneficiado do avanço em tecnologias de sensoriamento remoto e análise de dados. Esses desenvolvimentos **transformaram a análise de dados de sensores um componente essencial para a gestão dos parques eólicos offshore**, não apenas para garantir a eficiência e a sustentabilidade dessas instalações, mas também para assegurar a segurança operacional. As **turbinas, expostas a condições ambientais extremas, exigem monitoramento constante para garantir seu funcionamento contínuo e seguro**.

APLICAÇÕES DOS DADOS DE SENSORES EM TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE

Uma das **principais aplicações da análise de dados de sensores em parques eólicos offshore é a detecção precoce de corrosão**. Pesquisadores têm desenvolvido tecnologias avançadas de sensoriamento remoto que monitoram em tempo real a corrosão das estruturas metálicas das turbinas eólicas offshore. Através de sensores de ultrassom e tecnologias de Inteligência Artificial (IA), é possível prever o desgaste das superfícies, evitando falhas catastróficas e reduzindo o tempo de inatividade para manutenção. Além da corrosão, a análise de dados de sensores é amplamente aplicada no monitoramento do ciclo de vida das turbinas offshore.

Diversos estudos demonstram o uso de plataformas IoT para avaliar a condição de componentes ao longo de todas as fases do projeto eólico. Essas plataformas **são capazes de fornecer previsões detalhadas sobre o estado ou condição operacional dos componentes**, permitindo uma manutenção planejada e econômica.

O **uso de sensores, combinado com métodos analíticos**, vai além do simples suporte às atividades de Operação e Manutenção (O&M). Durante a **fase de estudo de viabilidade de projetos eólicos offshore, são realizadas fases de testes e medições de vento no mar, utilizando sensores distribuídos na região alvo**. Um exemplo dessa tecnologia é o Bravo, desenvolvido pela Petrobras – um modelo flutuante de Lidar (*Light Detection and Ranging*) projetado para a coleta, monitoramento e avaliação de recursos eólicos offshore. Esse sensor óptico utiliza feixes de laser para medir a velocidade e a direção do vento, gerando dados compatíveis com o ambiente operacional das turbinas eólica (Figura 9).

Figura 9: Boia remota de avaliação de ventos offshore (Bravo)



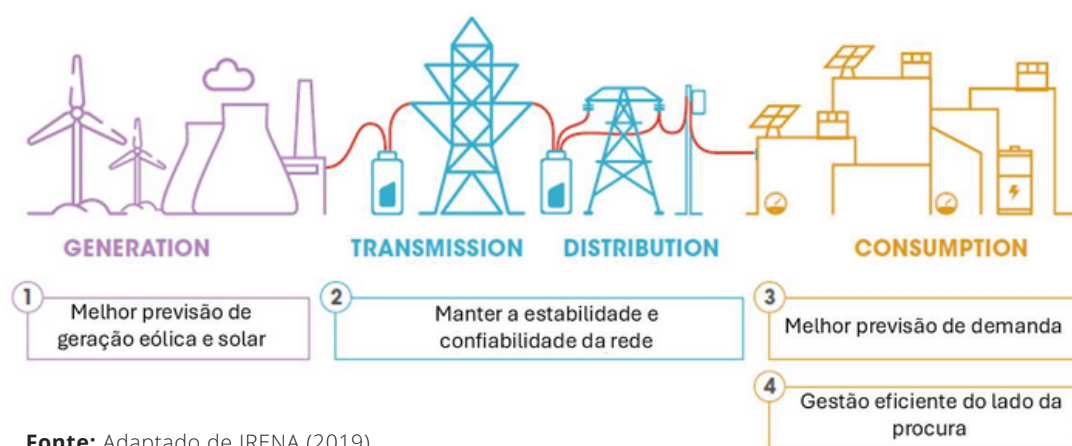
Fonte: Agência Petrobras (2024)

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

É de conhecimento geral que as diversas tecnologias de Inteligência Artificial (IA) vem emergindo como uma ferramenta poderosa e efetiva no cenário energético internacional. O relatório "*Artificial Intelligence and Big Data*" da IRENA (Figura 10), indica que as aplicações de IA podem ser utilizadas **desde as etapas de geração de energia oriundas de fontes renováveis até para fins de previsão de demanda energética por parte de consumidores**. Dentro deste contexto, no âmbito das aplicações relacionadas à geração, as

Redes Neurais Artificiais (RNAs) possuem extrema relevância para tratar diversas aplicações dentro da cadeia produtiva das eólicas offshore. A utilização das RNAs tem apresentado uma quebra de paradigma e vêm sendo empregadas com o **objetivo de garantir previsibilidade e segurança das operações e, como resultado, proporcionar maiores margens de receita aos empreendedores e gestores de parques eólicos**.

Figura 10: Aplicações emergentes de RNAs nos campos de energia



Fonte: Adaptado de IRENA (2019)

A Figura 11 demonstra uma etapa de estudo para a posterior utilização de RNA com vistas a **identificar as características de aves em parques eólicos**. A imagem (a) é a original da ave e a (b) imagem binária obtida como resultado da segmentação original com vistas a identificar o tamanho da ave.

Figura 11: Processo de segmentação para identificação do tamanho da ave



Fonte: Niemi (2018)

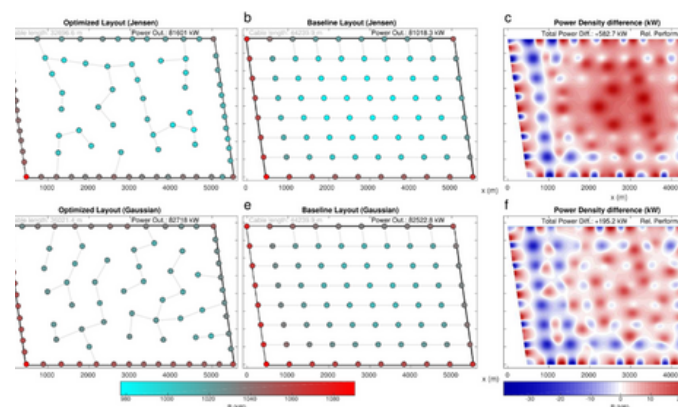
IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES PARA LAYOUT DOS PARQUES EÓLICOS OFFSHORE

A criação de layouts dos projetos no setor de eólicas offshore, tem como objetivo principal **descobrir a melhor posição dos aerogeradores para que seja possível aproveitar de forma maximizada o recurso energético disponível nas regiões litorâneas**. Os layouts de parques eólicos nada mais são do que a organização física e estrutural das turbinas eólicas, subestação e demais equipamentos relevantes que envolvem todo o complexo eólico offshore.

Diversas aplicações de IA tem emergido, permitindo com que ocorra a **otimização de layouts dos projetos**, além de auxiliar no suporte para a escolha final do arranjo a ser construído. O uso de IA atrelado ao estudo do recurso energético pode gerar vantagens associadas como a **diminuição do efeito esteira ("Wake effect")**, **menores custos na implantação dos projetos**, **taxa de retornos mais atrativas**, além de **aproveitar o máximo do recurso energético disponível na região de interesse**.

Para que essa otimização ocorra, existem diversas metodologias que abarcam o uso da IA e que podem ser aplicadas. Dentre as diversas metodologias existentes, podemos destacar: **(a) Algoritmos heurísticos; (b) Algoritmos genéticos; (c) técnicas de aprendizado de máquina**.

Figura 12: Exemplo dos resultados de um estudo de otimização de um parque eólico offshore real utilizando algoritmo genético



Fonte: Kirchner-Bossi e Porté-Agel (2018)

Os algoritmos matemáticos utilizados buscam **descobrir as melhores coordenadas em que as turbinas podem ocupar, o que permite uma melhor otimização para maximização de desempenho do parque**. Além disso, procura também o melhor posicionamento para a rede elétrica que interligará as unidades geradoras do parque eólico offshore.

Para o **funcionamento da solução**, são utilizados **dados satelitais além de séries históricas de vento e a aplicação da solução faz com que haja distintos arranjos de layouts** para a posterior escolha da melhor solução. A Figura 12 mostra um exemplo do uso de algoritmos genético para a otimização de um parque offshore real, onde os layouts otimizados estão à esquerda, os layouts de referência estão no centro e diferença espacial de potência eólica está à direita.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E SOLUÇÕES AEROESPACIAIS

A viabilização das eólicas offshore em larga escala depende da **cooperação multisetorial de diferentes segmentos que exploram inovações para acelerar a transição energética** por meio das eólicas offshore. Dentre estes segmentos, o setor de pesquisa e desenvolvimento de **soluções aeroespaciais** se destaca e traz **inovações diferenciadas** para o setor eólico offshore e onshore no cenário mundial.

Figura 13: Projeto de aerogerador denominado “O MOD-0A de 200 quilowatts” da ERDA-NASA em Block Island, Rhode Island



Fonte: NASA | Artigo: Glenn Responds to 1970s Energy Crisis

A aplicação de práticas de tecnologias espaciais na área de energia renovável é ampla e **perpassa pela utilização de satélites, armazenagem e gerenciamento de grandes quantidades de dados (“Big Data”) até a matéria prima utilizada para a fabricação de componentes dos aerogeradores**, como o caso das fibras de carbono utilizadas em pás.

Nas décadas de 1970 – 1980, a agência aeroespacial NASA trabalhou em pesquisas para estudar os caminhos para a investigação das possibilidades de escala de turbinas eólicas com apoio e financiamento de alguns departamentos como *National Science Foundation* e o *Department of Energy (DOE)*. Essas pesquisas testaram a **viabilidade técnica e comercial** a partir de 13 projetos de aerogeradores, considerando turbinas eólicas de 200 quilowatts, 2.000 quilowatts, 2,5 megawatts e 3,2 megawatts (Figura 13). Essas pesquisas **ratificam o caminho entre a proximidade dos segmentos setoriais de aeroespacial e energia eólica**.

Ao longo da história, **a tecnologia espacial e a inovação em energias renováveis estiveram intrinsecamente ligadas, impulsionando o progresso e moldando a nossa compreensão e utilização sustentável da energia**. Desde os primeiros satélites, que permitiram a análise climática e a disponibilização de uma quantidade massiva de dados que funcionaram como subsídios para uma precisa otimização de centrais eólicas e solares, até às mais recentes pesquisas em painéis solares no espaço. Os campos da energia e tecnologia aeroespacial têm colaborado para ultrapassar os limites do que é possível, refletindo a sinergia em curso e promovendo o progresso tecnológico e a transformação global rumo a um futuro mais verde e eficiente.

MERCADO DE CARBONO: UM MECANISMO IMPULSIONADOR

O mercado de carbono é um **mecanismo econômico desenvolvido para auxiliar no enfrentamento das mudanças climáticas**. Fundamenta-se na premissa de que o carbono, por ser um dos principais responsáveis pelo aquecimento global, deve ser precificado. Essa estratégia busca incentivar a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) por empresas e nações, tornando economicamente vantajoso a adoção de práticas mais sustentáveis.

ENERGIAS RENOVÁVEIS E O MERCADO DE CARBONO: CAMINHOS PARA A VALORAÇÃO DOS ATRIBUTOS SOCIOAMBIENTAIS

Projetos de energia renovável exemplificam iniciativas que geram créditos de carbono, preservam o meio ambiente e podem ser uma **fonte de financiamento para países em desenvolvimento**, que por vezes **carecem de recursos para implementar políticas climáticas eficazes**. Estas fontes renováveis podem ser **eólicas onshore, offshore, solar, biomassa, hidrogênio e outras fontes que permitam evitar impactos ambientais e compensar o carbono emitido**. Além disso, este processo de compensação pode abarcar iniciativas que envolvem imposições legais, imposto sobre emissões, sistemas de comercialização, subsídios e até mesmo metas para adoção de energia limpa.

Todas essas iniciativas são **maneiras de valorar o atributo socioambiental e já estão sendo exploradas por meio de diversos mecanismos regulatórios** e de mercado ao redor do mundo como: **mercado de certificação de energia renovável e impostos aplicados**. Esta valoração garante no longo prazo o contínuo crescimento de fontes de energia renovável que estão em processo de escala e poderão auxiliar no atingimento das metas climáticas estabelecidas pelo Netzero 2050 de manter a temperatura em 1,5C°.

MERCADO DE CARBONO E AS EÓLICAS OFFSHORE: AS ROTAS PARA ACELERAR A TECNOLOGIA

Com mercados regulados de carbono bem estabelecidos ao redor do mundo, projetos de eólicas offshore poderiam ser viabilizados **sem a necessidade de incorporação de subsídios** para serem desenvolvidos. Ainda, esse mercado pode se tornar um indutor da **redução da diferença de custo entre as tecnologias convencionais e as novas tecnologias**. Esse é um mecanismo estratégico para os países, que **proporcionará segurança jurídica, estímulo à negociação, inovação e competitividade**, evitando que o Brasil e outros países enfrentem barreiras comerciais no mercado externo, dada a crescente exigência global pela descarbonização e sustentabilidade.



MERCADO DE CARBONO: UM MECANISMO IMPULSIONADOR

DIGITAL TWINS E TECNOLOGIAS INOVADORAS

Os *Digital Twins* são uma tecnologia promissora para auxiliar na redução de custos da tecnologia eólica offshore, ampliando a capacidade instalada. Os *Digital Twins*, também denominados gêmeos digitais, **podem ser definidos como modelos virtuais que permitem a combinação entre ativos físicos**. Esses modelos virtuais contam com **indicadores e sensores que auxiliam em simulações matemáticas para viabilizar projetos de forma mais eficiente**.

A aplicação desta tecnologia depende de fatores como objetivo da aplicação, tipos de ativos físicos e dados analisados, ferramentas e tecnologias a serem utilizadas, as quais são adaptáveis para cada situação. Considerando os principais componentes de um parque eólico offshore, conforme mostrado na Figura 15, o *Digital Twin* pode ser desenvolvido e aplicado para cada um deles. Nos últimos anos o foco do desenvolvimento do setor **tem sido as turbinas eólicas offshore, componente primordial na geração de energia**.

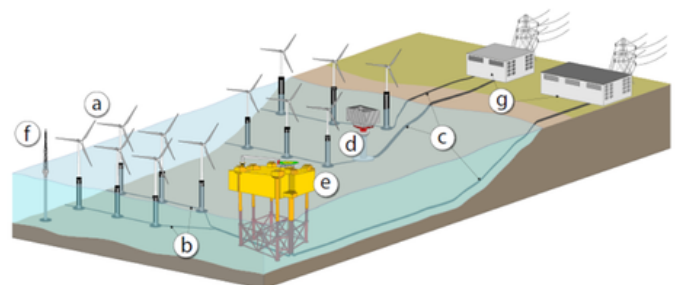
Figura 14: Aplicação do *Digital Twin* no ciclo de vida do produto



Fonte: Adaptado de Liu et al. (2024)

A tecnologia tem como **base o intercâmbio de informações entre o meio físico e o ambiente digital**, essa troca ocorre por meio de dados (informações) que são captadas por meio de sistemas de aquisição de dados (sistema de sensores), tendo grande impacto no ciclo de vida dos produtos e serviços (Figura 14). Os dados captados são direcionados para o meio digital onde terá informações sobre o funcionamento do equipamento, essas informações podem chegar em níveis extremamente detalhados como por exemplo: parâmetros dos componentes ou simulação de ambientes.

Figura 15: Principais componentes de um OWT



Fonte: Rodrigues et. al, (2016)

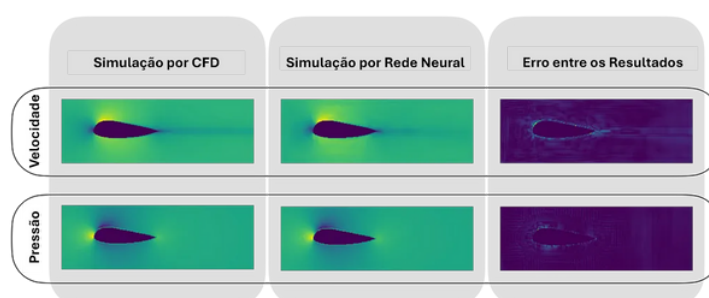
APLICAÇÕES DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL E IA

As **aplicações de fluidodinâmica computacional (CFD)** podem ser definidas como uma união da mecânica dos fluidos com métodos numéricos, onde a solução dos cálculos é realizada computacionalmente. Contudo, podemos expandir essa definição para compreender a importância de cada um desses tópicos. Os **métodos numéricos** são técnicas matemáticas empregadas para aproximar soluções de problemas complexos ou solução exata.

As redes neurais, treinadas com dados de simulações CFD, conseguem prever distribuições de pressão e velocidade em escoamentos com precisão suficiente para aplicações industriais.

Já os **Modelos de Ordem Reduzida** são simplificações matemáticas de sistemas complexos. Esses modelos são desenvolvidos para acelerar simulações e análises, diminuindo significativamente o custo computacional, sem comprometer a precisão de forma relevante (ex.: Figura 17).

Figura 16: Comparação de um perfil aerodinâmico entre a simulação computacional e o uso de Redes Neurais



Fonte: Medium (2020)

A **Inteligência Artificial (IA)** e a **CFD** tem sua sinergia, pois podem permitir a redução do custo computacional elevado, o tempo de simulação e a complexidade de fenômenos físicos, auxiliando na solução de problemas numéricos e simulações computacionais (Figura 16).

Os modelos de em que a IA pode auxiliar nas simulações de fluidodinâmica são: (a) Modelos Surrogate e (b) Modelos de Ordem Reduzida. Os modelos Surrogate são aproximações matemáticas que substituem sistemas complexos, como simulações detalhadas de IA. Estes modelos são treinados para replicar o comportamento de simulações completas de fluidodinâmica.

Figura 17: Turbina eólica representada por simulação de fluidodinâmica



Fonte: ANSYS (2017)

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, DATA CENTERS E CAMINHOS PARA A DEMANDA

As tecnologias de Inteligência Artificial (IA) têm crescido de forma ascendente nos últimos anos, tornando-se um tópico presente em diversas discussões tecnológicas e no uso social dos indivíduos. **A IA generativa se diferencia por sua capacidade de gerar novos dados, como imagens, textos e códigos, que se assemelham a dados reais produzidos pelos indivíduos.** Todavia, a utilização de IA generativa em larga escala demandará um alto consumo energético.

Em paralelo, **o crescimento da utilização de Data Centers se mostra oportuno para auxiliar nos caminhos da demanda energética** pela utilização de IA, considerando que o consumo de energia pelos DCs é elevado. Ou seja, além de contribuir para o crescimento do uso de IA generativa, **o uso de DCs auxiliará no aumento da capacidade instalada de fontes renováveis (ex.: eólicas, solar e hidrogênio) de energia** com fins de suprir esta grande demanda energética.

EÓLICAS OFFSHORE: UMA ROTA DE MERCADO

As eólicas offshore representam uma das soluções globais mais promissoras de energia limpa para atender à crescente demanda elétrica dos Data Centers (DCs), especialmente em um cenário de rápida expansão das tecnologias de inteligência artificial (IA). Com capacidade de gerar grandes volumes de energia e localizadas em hubs

portuários, essas instalações oferecem uma infraestrutura estratégica para suprir altas cargas elétricas, atendendo às características únicas da demanda energética dos DCs. Empresas líderes em tecnologia, como o Google, já estão utilizando essa tecnologia para impulsionar a transição energética. Recentemente, o Google firmou contratos significativos com parques eólicos offshore na Europa para alimentar seus DCs, incluindo um novo centro de US\$1 bilhão no Reino Unido que utilizará energia eólica proveniente da Escócia.

Esses projetos **mostram que as eólicas offshore têm escala e viabilidade econômica para atender à curva de carga constante dos DCs**, que exige um fornecimento ininterrupto e de alta densidade energética (Figura 18).

Figura 18: Data Center do Google em Eemshaven, Holanda



fonte: Google (2024)

IMPRESSÃO 3D: UM POTENCIAL FACILITADOR PARA INFRAESTRUTURA

A **tecnologia de impressão 3D** é uma forma de manufatura aditiva que se refere a qualquer processo de fabricação no qual objetos são criados pela adição de material, camada por camada, até formar a peça final. Esse conceito inclui diversas tecnologias, como **sinterização a laser, fusão por feixe de elétrons e a própria impressão 3D**.

A impressão 3D utiliza **modelos digitais para criar objetos tridimensionais**, construindo-os por meio da sobreposição progressiva de materiais em camadas. Esse processo pode empregar uma variedade de materiais, como plástico, metal, cerâmica e até biomateriais, dependendo da aplicação e da tecnologia utilizada.

No setor de energia eólica, as técnicas mais comuns incluem a tecnologia **FDM (Fused Deposition Modeling - Modelagem de Deposição Fundida)**, usada para fabricar protótipos e peças, e o **SLS (Sinterização a Laser Seletiva)**, que utiliza materiais como nylon.

BENEFÍCIOS DA IMPRESSÃO 3D

Os agentes da indústria estão reconhecendo cada vez mais as **vantagens da impressão 3D** na energia renovável, especialmente na energia eólica. Alguns dos benefícios da impressão 3D são:

- **Menor pegada de carbono:** A produção distribuída, feita sob demanda e próxima ao local onde os produtos são necessários, minimiza a necessidade de transporte por longas distâncias.
- **Redução de custos e aumento de disponibilidade:** A impressão 3D diminui os custos de produção e facilita prazos de entrega mais curtos.
- **Protótipos detalhados:** Versões de componentes mais realistas.
- **Personalização de peças:** Possibilidade de inovar com a criação de peças exclusivas.

Figura 19: Impressão 3D de componentes de concreto para estruturas offshore



Fonte: Rcam Technologies



EXPANDINDO OS HORIZONTES E PRÓXIMOS PASSOS

Os capítulos do trabalho foram estruturados para **apresentar um panorama abrangente sobre o papel da Inteligência Artificial (IA) e da Robótica no avanço da energia eólica offshore**. Desde a previsão de ventos e otimização do layout dos parques até o uso de robôs autônomos para manutenção preditiva, cada seção buscou detalhar como essas tecnologias ascendentes estão moldando o futuro dessa indústria.

As seções apresentadas no livro e que vão além do presente sumário executivo, demonstram como **IA e robótica podem contribuir diretamente para a redução das emissões de carbono e o cumprimento das metas do Net Zero**. A otimização dos parques eólicos offshore aumenta a participação das energias renováveis na matriz energética global, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis a partir dessa transição energética e mitigando os impactos das mudanças climáticas.

PRÓXIMOS PASSOS

Nos próximos anos, o mercado de energia eólica offshore precisará acompanhar de perto o avanço das tecnologias emergentes, especialmente no que se refere à crescente integração da IA e robótica. Para que essas **inovações sejam incorporadas de forma eficaz, será essencial investir em infraestrutura tecnológica, promover a digitalização dos processos e garantir a interoperabilidade entre diferentes sistemas**.

Além da adoção tecnológica, **questões como infraestrutura portuária, financiamento de projetos e fortalecimento da cadeia de suprimentos serão fatores críticos para o sucesso da energia eólica offshore**. Adicionalmente, a necessidade de capacitação profissional para lidar com as novas tecnologias e a criação de políticas públicas que incentivem a inovação e a sustentabilidade no setor serão aspectos centrais na construção de um futuro energético mais eficiente e sustentável. O sucesso da energia eólica offshore dependerá de um ecossistema integrado que combine avanços tecnológicos, infraestrutura otimizada e um ambiente regulatório favorável para garantir sua competitividade.

Para mais informações, por favor entre em contato:

Matheus Noronha

math.euriconoronha@icloud.com

www.matheuseurico.com.br

[Linkedin.com/in/matheusnoronha](https://www.linkedin.com/in/matheusnoronha)

São Paulo, SP - Brasil

Matheus de Paula

mat-paula@hotmail.com

[Linkedin.com/in/matheus-de-paula-839909119](https://www.linkedin.com/in/matheus-de-paula-839909119)

São Paulo, SP - Brasil

Uiara Valente

uiara29@hotmail.com

[Linkedin.com/in/uiaravalente](https://www.linkedin.com/in/uiaravalente)

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, ROBÓTICA E O DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA EÓLICA OFFSHORE

MATHEUS NORONHA | MATHEUS DE PAULA | UIARA VALENTE

SUMÁRIO

EXECUTIVO

