



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

MARKUS LOPES CORGOSINHO

**APRESENTAÇÃO DE UM NOVO CONCEITO DE DESIGN PARA AIRBORNE
WIND TURBINE**

Recife

2024

Markus Lopes Corgosinho

APRESENTAÇÃO DE UM NOVO CONCEITO DE DESIGN PARA AIRBORNE WIND TURBINE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energia da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de energia

Orientador: _____

Prof. Dr. Alexandre Costa

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 ALEXANDRE CARLOS ARAUJO DA COSTA
Data: 25/10/2024 12:46:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientadora : _____

Profa. Dra. Renata Francisca da Silva Santos

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 RENATA FRANCISCA DA SILVA SANTOS
Data: 25/10/2024 09:21:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Recife

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Corgosinho, Markus Lopes.

Apresentação de um novo conceito de design para airborne wind turbine /
Markus Lopes Corgosinho. - Recife, 2024.

64 : il., tab.

Orientador(a): Alexandre Carlos Araujo da Costa

Coorientador(a): Renata Francisca Da Silva Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Energia -
Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Airborne wind turbine. 2. Geração distribuída. 3. Design de modelo. 4.
Novos conceitos. 5. Microgeração. I. Araujo da Costa, Alexandre Carlos.
(Orientação). II. Silva Santos, Renata Francisca Da. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

Markus Lopes Corgosinho

APRESENTAÇÃO DE UM NOVO CONCEITO DE DESIGN PARA AIRBORNE WIND TURBINE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energia da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Energia.

Aprovado em: 24/10/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 MARIO AUGUSTO BEZERRA DA SILVA
Data: 25/10/2024 15:42:35-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Mário Bezerra

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 GUSTAVO DE NOVAES PIRES LEITE
Data: 25/10/2024 16:46:42-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Gustavo Novas

Instituto Federal de Pernambuco

DEDICATÓRIA

Dedico toda esta jornada ao meu avô Marcílio que sempre esteve ao meu lado e me apoiou em todos os meus sonhos, à ele devo tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por ter me dado condições de estudar como função principal e por me apoiar. Aos meus amigos e colegas por sempre oferecer ajuda quando necessitei. Agradeço a minha companheira Bianka por nos últimos 5 anos ter aturado minhas crises, ajudando-me a erguer a cabeça e não desistir.

"O medo é o assassino da mente. O medo é a pequena morte que traz a aniquilação. Vou enfrentar o meu medo. Permitirei que ele passe sobre mim e através de mim. E quando tiver passado, virei o olho interior para ver seu caminho. Onde o medo tiver ido, não haverá nada. Só eu permanecerei." (HERBERT, Frank. Duna.).

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma proposta de design para turbinas eólicas aéreas, focada na microgeração e na geração distribuída de energia. A introdução contextualiza a relevância histórica da energia eólica, destacando as limitações das turbinas convencionais em regiões urbanas e remotas, além de explorar o potencial das Airborne Wind Turbines (AWT) para superar essas dificuldades. O principal objetivo do estudo é propor o Projeto Zephyrus, um conceito teórico que une um gerador de turbina a um dirigível, permitindo a operação em altitudes elevadas, onde os ventos são mais intensos e consistentes, sem a necessidade de infraestruturas fixas. A metodologia adotada incluiu revisão de literatura sobre os avanços no campo das turbinas eólicas aéreas, cálculos teóricos preliminares e a definição de parâmetros técnicos para a viabilidade do projeto. Os resultados parciais indicam que o Projeto Zephyrus tem potencial para operar de forma eficiente em altitudes entre 3 e 50 m/s, suportando um gerador de 9 kW com uma capacidade de elevação de 150 kg, utilizando materiais leves e duráveis, como fibra de carbono e polímeros reforçados. Conclui-se que o Projeto Zephyrus representa uma possível alternativa para a microgeração de energia renovável, ainda que se encontre entre os níveis TRL 1 e TRL 2, nos estágios iniciais de pesquisa, necessitando de mais estudos e testes para avançar em termos de viabilidade prática.

Palavras-chave: Airborne wind turbine; Geração distribuída; Design de modelo; Novos conceitos; Microgeração;.

ABSTRACT

This paper presents a design proposal for airborne wind turbines, focusing on microgeneration and distributed energy generation. The introduction contextualizes the historical relevance of wind energy, highlighting the limitations of conventional turbines in urban and remote areas, and explores the potential of Airborne Wind Turbines (AWT) to overcome these challenges. The main objective of the study is to propose the Zephyrus Project, a theoretical concept that combines a turbine generator with an airship, allowing operation at high altitudes where winds are stronger and more consistent, without the need for fixed infrastructure. The methodology adopted included a literature review on advancements in the field of airborne wind turbines, preliminary theoretical calculations, and the definition of technical parameters for the project's feasibility. Partial results indicate that the Zephyrus Project has the potential to operate efficiently at wind speeds between 3 and 50 m/s, supporting a 9 kW generator with a lifting capacity of 150 kg, using lightweight and durable materials such as carbon fiber and reinforced polymers. It is concluded that the Zephyrus Project represents a possible alternative for renewable energy microgeneration, although it is in the early stages of research (TRL 1 and TRL 2) and requires further studies and tests to advance in terms of practical feasibility.

Keywords: Airborne; Distributed generation; Model Design; New concept; Microgeneration.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2-1. HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DE AIRBORNE WIND TURBINES (AWT)	13
2-2. A NECESSIDADE DE ADAPTAÇÃO DO DESIGN NA MICROGERAÇÃO	14
2-3. TIPOS DE AWT	17
2-4. DIFERENTES DESIGNS DE AWT	20
2-5. APLICAÇÕES PRÁTICAS E CASOS DE SUCESSO	23
2-6. COMPARAÇÃO ENTRE AWT E TURBINAS EÓLICAS CONVENCIONAIS	25
2-7. DESAFIOS TÉCNICOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE AIRBORNE WIND TURBINES	28
3. PROPOSTA DE UM NOVO CONCEITO MODELO DE AIRBORNE WIND TURBINE	32
4. ENGENHARIA RELACIONADA À AERODINÂMICA	44
5. ATUAÇÃO DO PROJETO E GERAÇÃO DE ENERGIA ESPERADA	47
5-1. CUSTO ESPERADO PARA O PROJETO	48
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
7. CONCLUSÃO	56
8. REFERÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

A conversão da energia eólica em formas úteis de energia possui uma história que remonta à antiguidade, quando velas impulsionavam embarcações e moinhos eram utilizados para irrigação no século XII d.C. (RAGHEB, 2017). No entanto, foi somente no século XIX que surgiram os primeiros registros de dispositivos projetados para a geração de energia elétrica a partir da força dos ventos, marcando o início da evolução das turbinas eólicas modernas.

Com o avanço tecnológico, os aerogeradores de grande escala podem hoje atingir alturas de até 100 metros, com diâmetros superiores à 120 metros e capacidade de geração acima de 5 MW por unidade (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2023). No entanto, essa geração centralizada, comum em parques eólicos, enfrenta desafios significativos, como altos custos de infraestrutura e limitações geográficas. Em resposta a esses desafios, a geração distribuída tem ganhado força, permitindo que unidades menores e descentralizadas de produção energética sejam instaladas em locais próximos aos centros de consumo (TURN2ENGINEERING, 2023).

Neste contexto, a microgeração eólica se destaca como uma solução promissora, especialmente em áreas urbanas e remotas. No entanto, as turbinas eólicas convencionais enfrentam limitações impostas pela altura de instalação, tornando difícil o aproveitamento de ventos mais fortes que ocorrem em altitudes elevadas. A fim de superar essas barreiras, as Airborne Wind Turbines (AWT) emergem como uma tecnologia inovadora, capaz de operar em altitudes muito superiores, onde os ventos são mais intensos e consistentes.

Ventos constantes são aqueles que mantêm uma direção e velocidade relativamente estáveis ao longo do tempo, o que é essencial para a eficiência de sistemas de geração de energia eólica. Eles apresentam variações mínimas, o que permite o funcionamento contínuo e otimizado das turbinas. Esses ventos são comumente encontrados em altitudes mais elevadas e em regiões marítimas ou costeiras, onde os obstáculos são reduzidos e as condições atmosféricas tendem a ser mais estáveis (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2020).

Ventos intensos, por outro lado, referem-se àqueles que apresentam altas velocidades, geralmente superiores a 6 m/s, o que é considerado ideal para a geração de energia. Velocidades de vento mais elevadas aumentam o potencial de produção de eletricidade, já que a potência gerada por uma turbina eólica cresce exponencialmente com a velocidade do vento. Essas condições são frequentemente encontradas em altitudes mais elevadas, longe de barreiras geográficas que possam reduzir a velocidade do vento (NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2019).

Este trabalho propõe a análise da relevância das turbinas aéreas no cenário da microgeração de energia. Além disso, apresenta-se um novo conceito de design para turbinas aéreas, com o objetivo de maximizar a eficiência da captação de energia eólica em regiões onde a instalação de turbinas convencionais seria inviável, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas e zonas rurais de difícil acesso.

Desta forma, o presente estudo busca contribuir para o avanço da geração distribuída através da adoção de tecnologias emergentes, como as AWTs, analisando suas vantagens técnicas e sua aplicabilidade no contexto brasileiro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2-1. HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DE AIRBORNE WIND TURBINES (AWT)

O conceito de Airborne Wind Turbines (AWT) remonta ao início do século XX, quando surgiram as primeiras ideias sobre o uso da energia eólica em altitudes elevadas. No entanto, foi somente na década de 1980 que essas ideias começaram a ganhar forma, impulsionadas pelo trabalho pioneiro de Loyd (1980). Loyd foi o primeiro a propor o uso de pipas para captar a energia dos ventos em altitudes superiores, demonstrando que, quanto maior a altura, mais consistentes e poderosos são os ventos, permitindo uma geração de energia significativamente maior do que aquela alcançada com turbinas convencionais próximas ao solo.

O estudo de Loyd abriu as portas para uma série de avanços na tecnologia de AWTs. Nas décadas seguintes, especialmente nos anos 2000, pesquisas como as de Archer e Caldeira (2009) destacaram o potencial dos ventos em altitudes elevadas, confirmando a viabilidade técnica e econômica das turbinas aéreas. Archer e Caldeira demonstraram que as correntes de vento em altitudes entre 300 e 600 metros são mais fortes e constantes, oferecendo uma fonte de energia renovável promissora, especialmente em regiões com alta demanda energética e infraestrutura limitada.

A evolução dessa tecnologia continuou ao longo da década de 2010, com o desenvolvimento de sistemas mais avançados de controle automático e materiais mais leves e resistentes. Fagiani, Dario e Smith (2019) introduziram o uso de drones e pipas automatizadas para otimizar a captação de energia eólica em altitudes elevadas, superando muitos dos desafios encontrados por sistemas terrestres. Esses avanços tornaram as AWTs uma alternativa viável para a geração de energia em regiões remotas ou com geografia desafiadora, onde a instalação de torres eólicas convencionais seria impraticável.

Em 2015, Maier, Korsmeyer e Musial realizaram um estudo sobre a aplicação de materiais leves, como fibras de carbono e compostos plásticos reforçados, para aumentar a durabilidade das AWTs. Isso permitiu que as turbinas aéreas operassem

em condições climáticas adversas por períodos mais longos, sem comprometer a eficiência.

No final da década de 2010, Van der Vlugt et al. (2019) realizaram uma série de experimentos focados no desempenho de sistemas de pipas automatizadas para geração de energia. Seus resultados mostraram que a eficiência das turbinas aéreas poderia ser aumentada significativamente com o uso de tecnologias de controle automático, abrindo caminho para a comercialização e adoção em larga escala dessa tecnologia.

Portanto, a evolução das Airborne Wind Turbines (AWT) tem sido marcada por inovações constantes em design aerodinâmico, controle eletrônico e materiais. De uma ideia teórica no século XX, as AWTs tornaram-se uma alternativa promissora e viável para a geração de energia renovável, especialmente em locais onde as turbinas terrestres enfrentam desafios de implementação.

2-2. A NECESSIDADE DE ADAPTAÇÃO DO DESIGN NA MICROGERAÇÃO

Historicamente, os sistemas de microgeração eólica eram, em grande parte, uma versão miniaturizada dos aerogeradores de grande porte, replicando o design e os princípios de operação dessas máquinas. No entanto, à medida que a demanda por geração distribuída de energia aumentou, surgiram novos desafios que exigem soluções inovadoras. Entre esses desafios, destacam-se as limitações impostas pela infraestrutura convencional, os altos custos de instalação e manutenção, e a dificuldade de aproveitar ventos de forma eficiente em áreas urbanas e rurais.

A microgeração, por definição, é destinada a operar em pequena escala, muitas vezes em residências ou pequenas comunidades, o que requer adaptações significativas no design para se ajustar às características do ambiente local. Assim, novos projetos começaram a se desviar das tradicionais turbinas eólicas horizontais, incorporando alternativas mais criativas e eficientes.

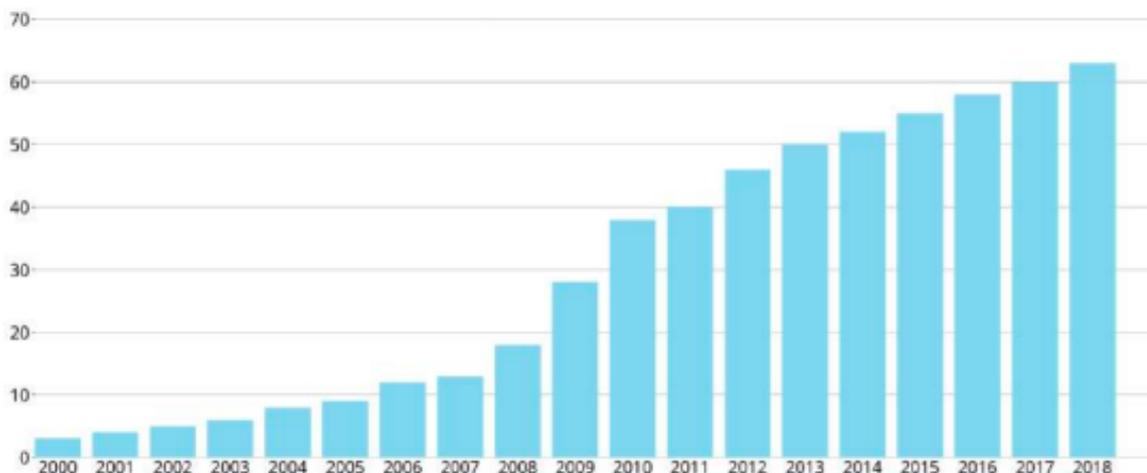
Uma dessas inovações foi o desenvolvimento de turbinas flutuantes, que permitem a captação de energia em regiões onde a instalação de turbinas convencionais seria inviável devido à falta de espaço ou à presença de obstáculos físicos.

Microgeradores instalados sobre superfícies aquáticas e turbinas que aproveitam o deslocamento de ar gerado por veículos em movimento são exemplos de novas abordagens que maximizam o uso dos recursos naturais de forma descentralizada. Essas inovações são especialmente vantajosas em áreas urbanas densamente povoadas, onde o espaço e as condições para a instalação de turbinas eólicas convencionais são limitados.

Outra inovação de grande potencial são as turbinas aéreas (airborne turbines); Ao serem suspensas no ar, essas turbinas podem capturar ventos em altitudes mais elevadas, onde a velocidade e a consistência dos ventos são significativamente maiores. Diferentemente das turbinas convencionais, que dependem de torres fixas, as turbinas aéreas são ancoradas por cabos e operam a centenas de metros de altura, oferecendo uma alternativa viável para a geração de energia em áreas urbanas e rurais de difícil acesso.

Estudos recentes, como os realizados por Mendonça et al. (2020), mostraram um aumento considerável no número de pesquisas e desenvolvimentos voltados para a Airborne Wind Energy (AWE). A Figura 1 ilustra esse crescimento, evidenciando o interesse crescente por essa tecnologia como uma solução inovadora para superar os desafios da microgeração e promover a descentralização da produção de energia.

Figura 1: Crescimento da pesquisa em AWE



Fonte: Mendonça et al (IJCIEOM 2020)

Além disso, os avanços recentes no design de turbinas de microgeração têm promovido uma revolução no setor. A Figura 2 ilustra o Microgerador Eólico Magnum 9 kW, que se destaca por sua alta eficiência em uma variedade de condições de vento, incluindo velocidades que vão de 3 m/s a 50 m/s. Esse tipo de microgerador é um exemplo prático da adaptação do design para maximizar a geração de energia em locais onde turbinas eólicas convencionais não seriam viáveis.

Figura 2: Microgerador Eólico Magnum 9 kW



Fonte: The Book by TESUP

Portanto, a necessidade de adaptar o design das turbinas de microgeração é evidente, uma vez que as tecnologias convencionais já não atendem às demandas

das novas realidades energéticas. O futuro da geração distribuída dependerá da capacidade de integrar essas novas tecnologias de forma eficiente, garantindo maior autonomia energética para comunidades urbanas e rurais.

2-3. TIPOS DE AWT

As Airborne Wind Turbines são uma tecnologia emergente no campo da energia renovável, projetada para captar a energia dos ventos em altitudes mais elevadas, aonde os ventos apresentam maior intensidade e estabilidade. Existem diferentes tipos de AWT que podem ser categorizados com base na forma como a energia é gerada e transferida para o solo. Essas categorias principais são a geração aerotransportada (Airborne Generation) e a geração baseada no solo (Ground-Based Generation). Cada tipo possui características específicas, vantagens e desafios tecnológicos que definem sua aplicação e desempenho.

Nas AWT de geração aerotransportada, a energia elétrica é gerada diretamente no ar, utilizando sistemas como pipas ou drones equipados com geradores. Esses sistemas operam em altitudes elevadas, entre 200 e 600 metros ou até mais alto, dependendo das condições climáticas e do projeto. O princípio básico dessas turbinas envolve o uso de dispositivos suspensos, como pipas e drones e balões, que capturam a energia do vento em altitudes onde ele é mais constante e poderoso. Esses dispositivos são equipados com turbinas ou mecanismos que convertem a energia cinética do vento em eletricidade, diretamente no ar. A energia gerada é então transmitida ao solo através de cabos de alta tensão, permitindo o seu uso na rede elétrica. Esse tipo de sistema se destaca por operar sem a necessidade de grandes torres fixas, como nas turbinas eólicas convencionais, o que reduz a infraestrutura necessária e aumenta a flexibilidade operacional (AHMED; SCHMEHL, 2019).

Um exemplo dessa tecnologia é o uso de pipas controladas automaticamente, equipadas com turbinas que capturam a energia dos ventos em altitudes elevadas. Essas pipas, ao voarem a grandes altitudes, aproveitam ventos mais fortes e geram eletricidade de maneira contínua. No entanto, o desafio tecnológico para esse tipo

de AWT está na manutenção da estabilidade da pipa durante ventos variáveis e na durabilidade dos materiais. Apesar desses desafios, o potencial para capturar grandes quantidades de energia é significativo, especialmente em regiões onde ventos fortes são frequentes (FAGIANI; DARIO; SMITH, 2019).

Outro exemplo são as turbinas aéreas controladas por drones, que oferecem um nível maior de controle sobre a operação, já que os drones podem ajustar sua posição e altura em resposta às condições de vento. Essas turbinas são mantidas no ar por drones e capturam a energia eólica em altitudes elevadas, garantindo um fornecimento estável de eletricidade. No entanto, o desenvolvimento de sistemas de controle eficientes e a manutenção prolongada em operação ainda representam desafios significativos para essa tecnologia (VAN DER VLUGT et al., 2019).

Por outro lado, as AWT de geração baseada no solo operam de maneira diferente. Nesse tipo de sistema, o dispositivo de captação de vento, como pipas ou asas voadoras, opera em altitudes elevadas, mas a geração de eletricidade ocorre no solo. A energia cinética gerada pelo movimento das pipas ou asas é transferida para o solo por meio de cabos de tração, que acionam geradores localizados no solo. Esses geradores convertem a energia mecânica em eletricidade, que é distribuída através da rede elétrica. A vantagem principal deste sistema é que os componentes elétricos, como geradores e sistemas de controle, permanecem no solo, o que facilita a manutenção e reduz os custos operacionais. Além disso, esses sistemas tendem a ser mais estáveis em condições de vento adversas, já que a geração de energia ocorre no solo e não depende diretamente das condições atmosféricas em altitudes elevadas (ARCHER; CALDEIRA, 2009).

Um exemplo comum de AWT de geração baseada no solo é o sistema de pipas com cabos de tração. Nesse sistema, pipas voam em altitudes elevadas e seu movimento é usado para puxar cabos que acionam geradores no solo. Esse mecanismo, conhecido como sistema de kite power, tem se destacado pela sua eficiência na captura de ventos de alta altitude e pela simplicidade do design. No entanto, um dos desafios desse sistema é garantir que os cabos de tração resistam ao estresse

constante causado pelos ventos, além de questões de durabilidade dos materiais e resistência às condições climáticas extremas (AHMED; SCHMEHL, 2019).

Outro exemplo é o sistema de asas voadoras, que utiliza uma asa rígida para capturar a energia dos ventos, conectada a cabos que acionam geradores no solo. A principal vantagem desse sistema é a capacidade de operar em altitudes mais elevadas do que as turbinas eólicas convencionais, o que aumenta a eficiência da captura de vento. O controle automatizado da asa permite ajustes em tempo real, otimizando a geração de energia, mas desafios relacionados ao controle do voo e à durabilidade da estrutura ainda precisam ser superados (MAIER; KORSMEYER; MUSIAL, 2015).

A comparação entre os dois tipos de AWT revela que cada um oferece vantagens e desvantagens específicas. As AWT de geração aerotransportada, por exemplo, oferecem maior mobilidade, uma vez que o sistema de geração está integrado diretamente aos dispositivos que flutuam no ar. Isso permite que o sistema seja movido de um local para outro com facilidade, o que é particularmente útil em áreas remotas ou em situações temporárias. No entanto, esses sistemas enfrentam desafios na manutenção, já que operar a grandes altitudes torna difícil o acesso aos componentes para reparos ou ajustes (FAGIANI; DARIO; SMITH, 2019).

Por outro lado, as AWT de geração baseada no solo são mais fáceis de manter, uma vez que os geradores e os sistemas de controle estão localizados no solo, facilitando o acesso para manutenção. Além disso, esses sistemas são geralmente mais estáveis em condições de vento variável, já que os geradores não estão expostos diretamente às mudanças nas condições atmosféricas. No entanto, esse tipo de AWT pode ser limitado na altura que consegue atingir, o que significa que nem sempre consegue acessar os ventos mais intensos e previsíveis presentes em altitudes mais elevadas (ARCHER; CALDEIRA, 2009).

Os diferentes tipos de AWT enfrentam desafios tecnológicos que continuam a impulsionar inovações no campo. No caso das AWT de geração aerotransportada, o principal desafio está na estabilidade do voo e na eficiência dos sistemas de

controle. Nos últimos anos, avanços significativos em drones e pipas automatizadas têm melhorado a viabilidade dessa tecnologia, permitindo maior controle sobre as turbinas e aumentando a eficiência na captura de vento em altas altitudes. A manutenção dessas turbinas, no entanto, ainda representa um obstáculo, especialmente em condições climáticas adversas. Para as AWT de geração baseada no solo, os desafios estão concentrados na durabilidade dos cabos de tração e na integração eficiente dos geradores com a rede elétrica. No entanto, a simplicidade operacional e a facilidade de manutenção tornam esses sistemas promissores para aplicações em larga escala.

As Airborne Wind Turbines (AWT) apresentam o potencial de superar várias limitações enfrentadas pelas turbinas eólicas convencionais, que são comumente restritas pela altura de instalação. Uma das principais limitações das turbinas tradicionais é que elas não conseguem alcançar as altitudes onde os ventos são mais intensos e constantes, reduzindo assim a eficiência de geração de energia. Além disso, essas turbinas estão sujeitas a maiores custos de infraestrutura e manutenção, devido à necessidade de torres altas e sistemas de suporte robustos (IRENA, 2020). Outro desafio enfrentado por turbinas convencionais é a interferência geográfica, como montanhas ou edifícios em áreas urbanas, que pode reduzir significativamente a velocidade do vento e aumentar a turbulência, comprometendo a performance (NREL, 2019).

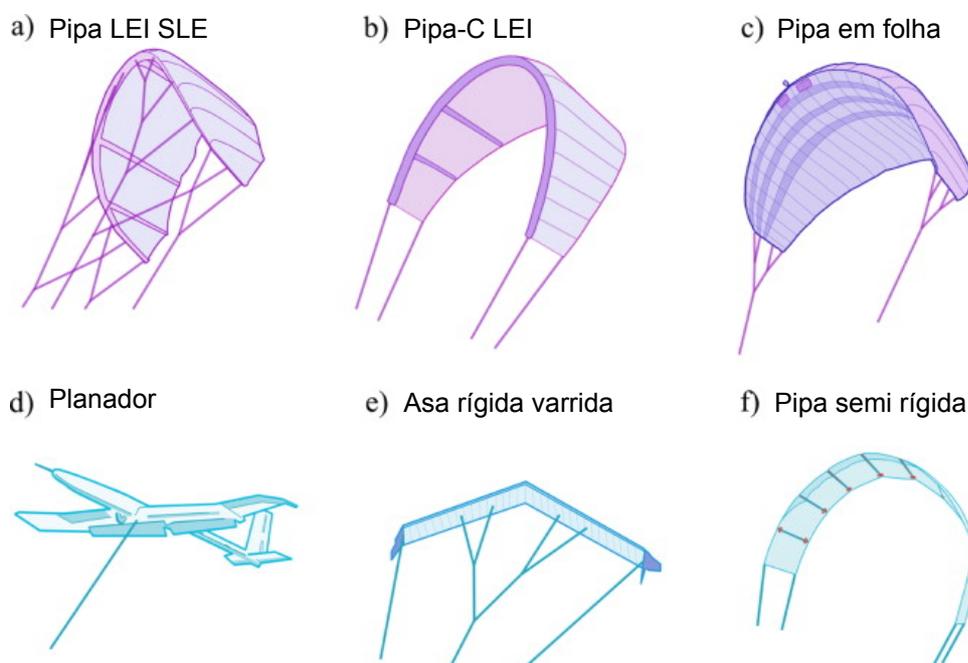
As AWTs, por sua vez, podem operar em altitudes muito superiores, onde os ventos são mais previsíveis e fortes, evitando muitos desses obstáculos. Além disso, como o sistema de geração de energia está localizado no ar e conectado ao solo por cabos, a manutenção pode ser feita mais facilmente no nível do solo, reduzindo os custos operacionais e de manutenção (AWEA, 2021).

2-4. DIFERENTES DESIGNS DE AWT

As AWTs, tanto na categoria de geração aerotransportada quanto na de geração baseada no solo, possuem uma ampla variedade de designs e configurações. Como ilustrado nas Figuras 4 e 5, é possível observar diferentes modelos de turbinas

voltadas para a geração terrestre e aérea, respectivamente. Cada design traz consigo uma série de desafios técnicos como o controle e estabilidade em altitudes elevadas, e a durabilidade dos materiais, como fibra de carbono, que precisam resistir a condições climáticas extremas. Outro obstáculo é a interferência no espaço aéreo, uma vez que as AWTs operam em altitudes que podem coincidir com rotas de aeronaves (IEA,2023) e regulatórios que precisam ser enfrentados antes que as AWTs possam ser uma opção a ser adotadas em larga escala como fontes principais de energia.

Figura 4: Modelos de AWE de ground-based generation

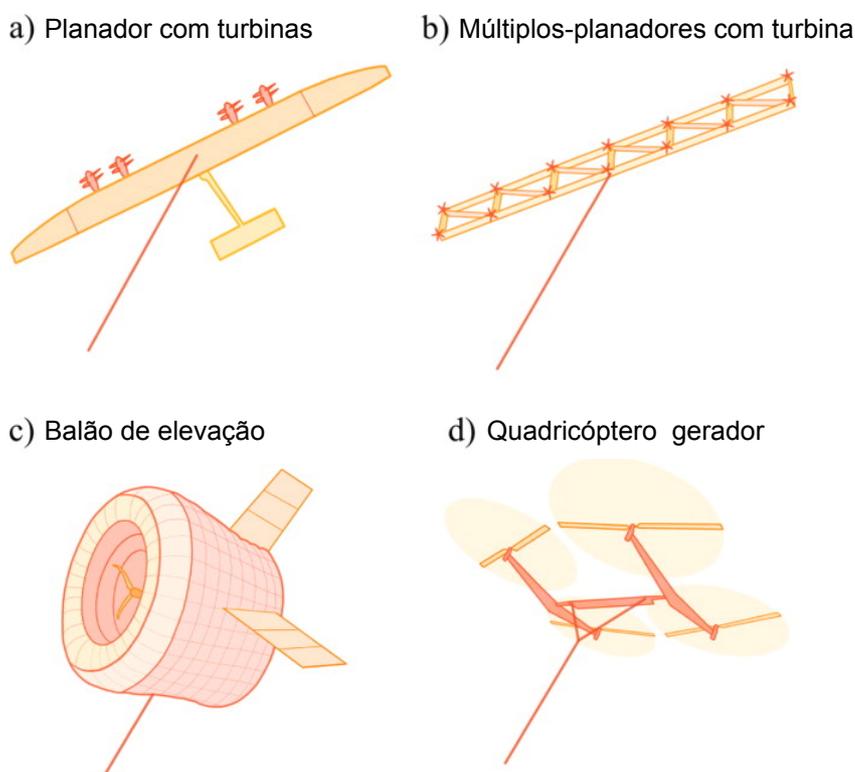


Fonte: Adaptado de Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews

Outro aspecto técnico relevante refere-se à manutenção dessas turbinas, que muitas vezes estão situadas em áreas remotas ou de difícil acesso. A realização de manutenções frequentes em turbinas suspensas, especialmente em sistemas de geração aerotransportada, continua a ser um grande desafio para a adoção dessa tecnologia em larga escala. No entanto, os avanços recentes no uso de drones e pipas automatizadas têm proporcionado um controle mais eficiente sobre as turbinas, além de melhorar a captura de vento em altitudes mais elevadas.

Esses drones são capazes de realizar inspeções rotineiras em locais de difícil acesso, como as turbinas aéreas, sem a necessidade de intervenção humana direta, o que aumenta a segurança e reduz os custos operacionais. As pipas automatizadas, por sua vez, ajustam-se dinamicamente para otimizar a captura de ventos consistentes em grandes altitudes, maximizando a eficiência na geração de energia. Tais inovações estão gradualmente superando os entraves à manutenção e operação dessas turbinas, promovendo assim o aumento da sua viabilidade comercial e técnica.

Figura 5: Modelos de AWE de airborne generation



Fonte: Adaptado de Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews

Além dos desafios técnicos, as AWTs também enfrentam uma série de obstáculos regulatórios. A certificação e aprovação dessas tecnologias por agências reguladoras, a definição de padrões de segurança e desempenho, bem como a integração dessas turbinas aos sistemas de gestão de energia existentes, são questões que devem ser endereçadas para garantir uma adoção segura e eficiente das AWTs. Estabelecer padrões regulatórios claros e globais para garantir a

segurança operacional, principalmente em áreas densamente povoadas ou em zonas de tráfego aéreo, é essencial para o futuro da tecnologia.

Apesar dessas dificuldades, diversas empresas estão avançando no desenvolvimento de designs inovadores para Aerogeradores de Alta Altitude (AWE, do inglês Airborne Wind Energy). Uma dessas empresas é a Ampyx Power, sediada na Alemanha, que está desenvolvendo uma turbina aérea do tipo 5.a, cujo design lembra o de um avião com turbinas. Esse modelo tem se destacado pela capacidade de operar em altitudes elevadas, capturando ventos mais consistentes e garantindo maior eficiência na geração de energia. Outra empresa que está na vanguarda desse setor é a SkySails Group, também da Alemanha, que já possui uma forte presença no mercado com turbinas do tipo 4.c, demonstrando o potencial comercial e a viabilidade das AWTs.

Esses avanços representam um passo significativo rumo à diversificação e descentralização das fontes de energia renovável. Ao oferecer soluções inovadoras para os desafios energéticos do século XXI, as AWTs prometem não apenas aumentar a eficiência da geração eólica, mas também expandir a utilização dessa energia em áreas onde as turbinas eólicas convencionais não são viáveis. Com o desenvolvimento contínuo de tecnologias, materiais e regulamentações adequadas, as AWTs podem desempenhar um papel fundamental na transição global para fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

2-5. APLICAÇÕES PRÁTICAS E CASOS DE SUCESSO

As aplicações práticas das Airborne Wind Turbines (AWT) têm demonstrado um grande potencial em diversos contextos, tanto em áreas remotas quanto em cenários urbanos. O uso de AWT oferece soluções inovadoras para superar limitações que tradicionalmente afetam as turbinas eólicas convencionais, como a necessidade de grandes espaços e infraestruturas fixas. Um dos casos mais notáveis de aplicação prática de AWT é o uso em áreas rurais e remotas, onde o acesso à rede elétrica é limitado ou inexistente. Nesses locais, a mobilidade e a flexibilidade das AWT permitem a geração de energia de maneira autossuficiente, fornecendo eletricidade para pequenas comunidades, instalações agrícolas, e até

operações industriais isoladas. Além disso, a capacidade de gerar energia em altitudes elevadas, onde os ventos sopram de forma mais vigorosa e contínua, torna as AWT uma opção particularmente eficiente e econômica para regiões com infraestrutura limitada (BECKER; KOOPMANN; LOHMANN, 2016).

As AWT também têm sido aplicadas com sucesso em áreas urbanas, onde a instalação de turbinas eólicas convencionais é geralmente limitada pelo espaço disponível e pelo impacto visual e sonoro. Nesse contexto, as AWT representam uma solução viável, pois podem ser implementadas em áreas densamente povoadas sem a necessidade de grandes estruturas fixas. A operação em altitudes elevadas, acima da turbulência causada pelos edifícios, permite que as turbinas capturem ventos mais estáveis e gerem eletricidade de maneira eficiente. Alguns projetos experimentais têm utilizado AWT em áreas urbanas para alimentar redes elétricas locais e projetos de microgeração, mostrando que essa tecnologia pode ser adaptada para complementar outras formas de geração de energia renovável em cidades. Esse uso tem sido facilitado pelo avanço das tecnologias de controle, que permitem que as turbinas sejam operadas de maneira autônoma e segura em ambientes urbanos (HOUCHI et al., 2022).

Outro caso de sucesso envolvendo AWT é o uso dessa tecnologia em operações militares e humanitárias. Devido à sua mobilidade e facilidade de transporte, as AWT são ideais para fornecer energia em situações de emergência, onde há uma necessidade urgente de eletricidade em áreas sem infraestrutura adequada. Em operações militares, por exemplo, as AWT podem ser usadas para alimentar sistemas de comunicação, equipamentos de monitoramento e até veículos elétricos em áreas remotas. Da mesma forma, em missões humanitárias, essas turbinas têm sido utilizadas para fornecer eletricidade para campos de refugiados e regiões afetadas por desastres naturais, onde o acesso à energia é crucial para a provisão de serviços essenciais, como hospitais de campanha e sistemas de purificação de água (BECKER; KOOPMANN; LOHMANN, 2016).

Essas aplicações práticas destacam o potencial das AWT para transformar a forma como a energia é gerada e distribuída. Apesar dos desafios técnicos e logísticos que

ainda precisam ser resolvidos, os casos de sucesso indicam que as AWT podem desempenhar um papel crucial na diversificação da matriz energética global. À medida que as tecnologias continuam a evoluir e os custos de produção e manutenção diminuem, espera-se que as AWT se tornem uma alternativa cada vez mais viável para a geração de energia renovável em uma variedade de contextos, desde áreas urbanas até offshore e operações em locais remotos (HOUCHI et al., 2022).

2-6. COMPARAÇÃO ENTRE AWT E TURBINAS EÓLICAS CONVENCIONAIS

A comparação entre as Airborne Wind Turbines (AWT) e as turbinas eólicas convencionais destaca diferenças fundamentais em termos de design, funcionamento, eficiência, viabilidade econômica e desafios técnicos. Ambas as tecnologias compartilham o mesmo objetivo de converter a energia dos ventos em eletricidade, mas o fazem de maneiras distintas, aproveitando características diferentes do ambiente atmosférico. Enquanto as turbinas eólicas convencionais se baseiam em estruturas fixas e robustas, as AWT oferecem uma abordagem mais flexível e inovadora, operando em altitudes elevadas com dispositivos móveis e sistemas de geração baseados no ar.

As turbinas eólicas convencionais são amplamente conhecidas e utilizadas em todo o mundo para a geração de energia renovável, sendo instaladas tanto em terra (onshore) quanto em plataformas marítimas (offshore). Elas dependem de grandes torres, com alturas que podem atingir até 100 metros, e rotores de grande diâmetro que capturam a energia do vento a uma altitude relativamente baixa em comparação com as AWT. Essas turbinas fixas têm se mostrado eficazes na geração de grandes quantidades de eletricidade, especialmente em áreas com fortes correntes de vento, como planícies e regiões costeiras. No entanto, seu principal desafio é a limitação imposta pelas alturas em que operam, já que ventos com maior força e constância costumam ocorrer em altitudes muito maiores, acima de 500 metros, o que está fora do alcance das turbinas convencionais (WILLIAMS et al., 2020).

As AWT, por outro lado, operam em altitudes significativamente mais altas, onde os ventos são mais constantes e potentes. Esse é um dos principais diferenciais das AWT em relação às turbinas eólicas convencionais. Estudos mostram que a velocidade dos ventos em altitudes mais elevadas é muito superior àquela próxima ao solo, o que permite às AWT capturar mais energia com um menor esforço mecânico. Além disso, a operação em altitudes elevadas permite que as AWT evitem obstáculos comuns ao nível do solo, como colinas, edifícios e vegetação, que podem interferir na consistência e na força dos ventos captados pelas turbinas convencionais. Com essa vantagem, as AWT conseguem gerar eletricidade de forma mais eficiente em condições onde as turbinas fixas teriam dificuldades de operar (BECKER; KOOPMANN; LOHMANN, 2016).

Em termos de infraestrutura, a instalação de turbinas eólicas convencionais requer investimentos significativos em torres, fundações e redes de transmissão de energia, além de grandes áreas de terreno. Essas turbinas também são limitadas pela necessidade de terrenos amplos e relativamente planos para sua instalação, o que pode restringir sua aplicação em regiões montanhosas, densamente povoadas ou com características geográficas adversas. Por outro lado, as AWT oferecem uma possível solução mais flexível, uma vez que não dependem de estruturas fixas e podem ser transportadas e instaladas com mais facilidade. Sua mobilidade permite que sejam utilizadas em uma variedade de locais, incluindo áreas remotas ou com pouca infraestrutura, sem a necessidade de grandes obras de construção. Além disso, as AWT podem ser instaladas em ambientes onde as turbinas convencionais não são viáveis, como em áreas urbanas densamente povoadas ou em regiões de difícil acesso, como florestas e zonas montanhosas (HOUCHI et al., 2022).

Outro ponto de comparação importante é o impacto visual e sonoro causado pelas duas tecnologias. As turbinas eólicas convencionais, devido ao seu grande porte e altura, são frequentemente criticadas pelo impacto que causam na paisagem, especialmente em áreas de grande valor estético ou turístico. Além disso, o ruído gerado pelos rotores das turbinas pode ser uma preocupação em locais próximos a áreas residenciais. Já as AWT, por operarem em altitudes muito mais elevadas, reduzem significativamente o impacto visual e o nível de ruído, tornando-as uma

opção mais adequada para áreas onde esses fatores são cruciais. Como as AWT estão localizadas a centenas de metros acima do solo, elas ficam praticamente invisíveis da superfície, o que diminui o impacto sobre a paisagem natural e a aceitação pública dessas tecnologias tende a ser maior (BECKER; KOOPMANN; LOHMANN, 2016).

No entanto, as AWT enfrentam desafios únicos, especialmente relacionados à manutenção e ao controle. Como essas turbinas operam em altitudes elevadas, o acesso aos seus componentes para reparos e ajustes é mais complexo em comparação com as turbinas convencionais, que podem ser mantidas com mais facilidade devido à sua estrutura fixa e acessível. Além disso, a operação das AWT depende de sistemas avançados de controle automatizado para manter a estabilidade e o desempenho ideal em altitudes elevadas, onde as condições atmosféricas podem variar rapidamente. A necessidade de garantir que esses sistemas sejam confiáveis e possam operar por longos períodos sem intervenção humana é um dos maiores obstáculos para a implementação em larga escala das AWT. Em contrapartida, as turbinas eólicas convencionais têm uma operação mais simples e menos suscetível a variações atmosféricas extremas, tornando-as uma escolha mais confiável em termos de manutenção e longevidade operacional (WILLIAMS et al., 2020).

Além disso, em termos de custo, as AWT ainda enfrentam desafios de viabilidade econômica em relação às turbinas convencionais. Embora a flexibilidade e o potencial de geração em altitudes elevadas ofereçam uma clara vantagem em termos de eficiência energética, o desenvolvimento de AWT ainda está em estágios iniciais, o que significa que os custos de pesquisa, desenvolvimento e implementação podem ser elevados. Por outro lado, as turbinas eólicas convencionais já passaram por décadas de refinamento e otimização, o que resultou em uma redução significativa dos custos de produção e instalação. No entanto, à medida que a tecnologia de AWT avança e se torna mais acessível, há um potencial para que os custos operacionais e de instalação também diminuam, tornando-as uma alternativa competitiva no futuro (HOUCHI et al., 2022).

Por fim, ambas as tecnologias possuem papéis importantes no cenário energético global. As turbinas eólicas convencionais são uma tecnologia madura e amplamente utilizada, capaz de gerar grandes quantidades de energia de forma confiável. No entanto, as AWT oferecem uma solução inovadora para superar as limitações das turbinas convencionais, especialmente em termos de eficiência em altitudes elevadas e flexibilidade de instalação. Embora ainda enfrentem desafios técnicos e econômicos, as AWT têm o potencial de complementar as turbinas convencionais, expandindo a capacidade de geração de energia renovável em áreas onde as soluções tradicionais não são viáveis (BECKER; KOOPMANN; LOHMANN, 2016).

A comparação entre AWT e turbinas eólicas convencionais revela que, embora as AWT ofereçam vantagens claras em termos de flexibilidade, eficiência em altitudes elevadas e menor impacto visual, elas ainda enfrentam desafios significativos relacionados à manutenção, controle e viabilidade econômica. À medida que a tecnologia avança, as AWT têm o potencial de se tornarem uma solução complementar valiosa para a geração de energia renovável, especialmente em áreas remotas e em situações onde as turbinas convencionais são limitadas.

2-7. DESAFIOS TÉCNICOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE AIRBORNE WIND TURBINES

A implementação de Airborne Wind Turbines (AWT) apresenta uma série de desafios técnicos que precisam ser superados para que essa tecnologia possa se consolidar como uma alternativa viável e eficiente na geração de energia renovável. Esses desafios envolvem aspectos relacionados ao design estrutural, controle e estabilidade das turbinas em grandes altitudes, durabilidade dos materiais, segurança operacional, e a integração dessas turbinas com a infraestrutura elétrica existente. Embora as AWT ofereçam vantagens significativas em termos de mobilidade, flexibilidade e capacidade de geração em altitudes elevadas, há uma série de barreiras tecnológicas e operacionais que exigem avanços contínuos em pesquisa e desenvolvimento.

Um dos principais desafios técnicos na implementação de AWT é o controle e a estabilidade dos dispositivos em altas altitudes. As AWT operam a centenas de metros acima do solo, onde as condições atmosféricas são significativamente diferentes das encontradas próximo à superfície. Para garantir o funcionamento eficiente das AWT, é necessário desenvolver sistemas de controle altamente sofisticados que possam ajustar a posição e o comportamento das turbinas em tempo real, respondendo rapidamente a essas variações climáticas. Isso exige o uso de sensores avançados e algoritmos de controle automático que possam monitorar constantemente as condições do vento e fazer ajustes precisos para maximizar a captação de energia e minimizar os riscos de falhas (WILLIAMS et al., 2020).

Além disso, o desafio de manter a estabilidade do voo é particularmente crítico em turbinas que utilizam pipas ou drones para capturar a energia do vento. Essas estruturas leves e móveis precisam ser controladas de forma eficaz para evitar colapsos ou desestabilização durante operações prolongadas. A perda de controle de uma pipa ou drone a centenas de metros de altura pode resultar em danos à turbina, ao equipamento de geração de energia ou até mesmo a estruturas e pessoas no solo. Por isso, é crucial que os sistemas de AWT sejam equipados com mecanismos de segurança e redundância que possam intervir em caso de falha do sistema principal, garantindo que a turbina seja trazida de volta ao solo de maneira segura e controlada (HOUCHI et al., 2022).

Outro desafio técnico importante está relacionado à durabilidade dos materiais utilizados nas AWT. Como essas turbinas operam em condições atmosféricas adversas, expostas a ventos fortes, chuva, gelo e outras intempéries, os materiais utilizados para construir as pipas, drones e cabos de transmissão precisam ser altamente resistentes e duráveis. Isso exige o desenvolvimento de novos compostos e ligas que possam suportar não apenas o desgaste mecânico causado pelo vento, mas também a corrosão e outros efeitos causados pela exposição prolongada aos elementos. Além disso, os materiais devem ser leves o suficiente para permitir que as turbinas permaneçam suspensas no ar, ao mesmo tempo em que são fortes o suficiente para resistir às forças aplicadas pelos ventos. O desenvolvimento de materiais como compósitos de fibra de carbono e plásticos reforçados tem sido

essencial para enfrentar esse desafio, mas ainda há muito a ser feito para garantir que as AWT possam operar de maneira confiável e econômica em longos períodos (BECKER; KOOPMANN; LOHMANN, 2016).

O desgaste dos cabos de transmissão de energia também representa um desafio significativo. Nas AWT, a eletricidade gerada no ar precisa ser transmitida ao solo por meio de cabos, que estão constantemente sob tensão e expostos às mesmas condições atmosféricas adversas que afetam o restante do sistema. Esses cabos não apenas precisam ser capazes de transmitir grandes quantidades de eletricidade com eficiência, mas também devem ser robustos o suficiente para suportar o estresse mecânico gerado pelos ventos e pelo movimento da turbina no ar. A resistência à tração é um dos principais fatores a serem considerados, já que esses cabos devem suportar o peso do gerador e dos dispositivos suspensos, além das forças geradas pelas correntes de vento. A manutenção desses cabos é complicada pela dificuldade de acesso às partes mais altas do sistema, o que torna a durabilidade dos materiais uma questão ainda mais crucial (WILLIAMS et al., 2020).

Além das questões relacionadas ao design e aos materiais, a segurança operacional é uma preocupação fundamental na implementação de AWT. Como essas turbinas operam em altitudes elevadas, elas interagem diretamente com o espaço aéreo, o que pode gerar conflitos com aeronaves e outras atividades aéreas. Em muitos países, a regulamentação do espaço aéreo é rigorosa, e a operação de AWT deve estar em conformidade com essas normas para evitar acidentes e colisões. Isso exige uma coordenação cuidadosa com as autoridades reguladoras de aviação, bem como o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento que possam garantir que as turbinas permaneçam dentro de zonas seguras de operação. Além disso, a queda de uma turbina ou de partes dela devido a falhas no sistema de controle ou à quebra de componentes pode representar um risco significativo para as pessoas e propriedades no solo, especialmente em áreas densamente povoadas. Assim, a segurança é um dos aspectos mais críticos a serem abordados no desenvolvimento de AWT (HOUCHI et al., 2022).

Outro desafio técnico significativo é a integração das AWT com a infraestrutura elétrica existente. Enquanto as turbinas eólicas convencionais são projetadas para se conectar diretamente à rede elétrica, as AWT operam de maneira diferente, gerando eletricidade em altitudes elevadas e transmitindo-a para o solo. Isso requer o desenvolvimento de sistemas de transmissão e conversão de energia que possam transformar a eletricidade gerada em corrente alternada compatível com a rede elétrica. Além disso, a intermitência dos ventos em grandes altitudes exige o uso de sistemas de armazenamento de energia, como baterias ou outras tecnologias, para garantir um fornecimento constante e estável de eletricidade à rede. A integração bem-sucedida das AWT com a infraestrutura existente também depende de uma coordenação cuidadosa entre as empresas de energia e os operadores de redes elétricas, para garantir que a eletricidade gerada pelas turbinas seja distribuída de forma eficiente e econômica (BECKER; KOOPMANN; LOHMANN, 2016).

Por fim, um desafio importante está relacionado aos custos de desenvolvimento e implementação das AWT. Embora essa tecnologia ofereça vantagens significativas em termos de eficiência energética e flexibilidade operacional, os custos associados ao seu desenvolvimento ainda são elevados. A pesquisa e o desenvolvimento contínuos de novos materiais, sistemas de controle e métodos de integração com a infraestrutura elétrica representam um investimento substancial. Além disso, como as AWT ainda estão em estágios iniciais de implementação comercial, os custos de fabricação e instalação permanecem altos em comparação com as turbinas eólicas convencionais, que já passaram por décadas de refinamento e otimização. Para que as AWT se tornem uma solução viável em larga escala, será necessário que esses custos sejam reduzidos, o que depende tanto de avanços tecnológicos quanto de um aumento na produção em massa e na adoção generalizada da tecnologia (WILLIAMS et al., 2020).

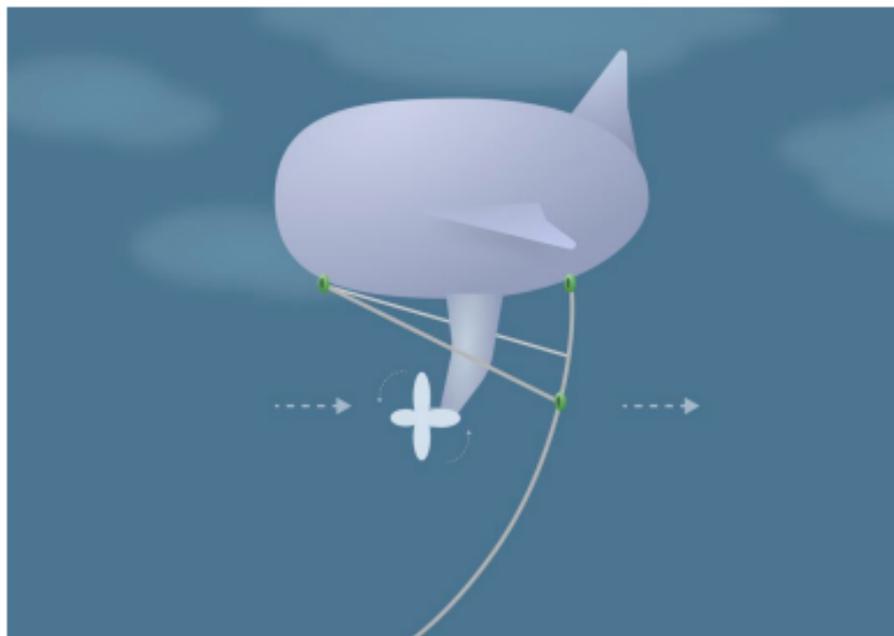
A implementação de Airborne Wind Turbines enfrenta desafios técnicos significativos que exigem uma abordagem multifacetada para serem superados. Desde o controle e a estabilidade das turbinas em grandes altitudes até a durabilidade dos materiais e a integração com a rede elétrica, esses desafios precisam ser abordados por meio de inovação tecnológica e colaboração entre empresas, governos e instituições de

pesquisa. Apesar desses obstáculos, o potencial das AWT para transformar o setor de energia renovável é inegável, e os avanços contínuos nessa área prometem abrir novas possibilidades para a geração de energia limpa e eficiente em todo o mundo.

3. PROPOSTA DE UM NOVO CONCEITO MODELO DE AIRBORNE WIND TURBINE

Com tanto potencial nas tecnologias de turbinas aéreas e inspirado pela visão de um futuro onde essas turbinas se tornam a principal fonte de energia, como visto no filme Big Hero 6, surge o conceito de um novo modelo na categoria de geração aérea. Esse design visa simplificar a fabricação, utilizando o gerador de uma turbina tradicional de microgeração acoplado a um dirigível de pequeno porte, adaptado com controle eletrônico para decolagem, pouso e manutenção de posição em altitudes elevadas. Assim, foi concebido o primeiro esboço do projeto, apresentado na Figura 6, ainda sem pesquisa aprofundada, sem cálculos aerodinâmicos e sem proporções definidas, apenas o conceito inicial.

Figura 6: Modelo em versão esboço



Fonte: Autor

O modelo proposto, denominado Projeto Zephyrus, busca unir a simplicidade e flexibilidade da microgeração com as vantagens de operar em altitudes onde os ventos são mais constantes e intensos. A função do dirigível seria sustentar o gerador a grandes alturas, proporcionando estabilidade e permitindo que o sistema capture o vento de forma mais eficiente, sem a necessidade de infraestruturas fixas como torres convencionais. Com essa abordagem, o sistema se torna mais móvel e adaptável a diferentes cenários e condições de vento.

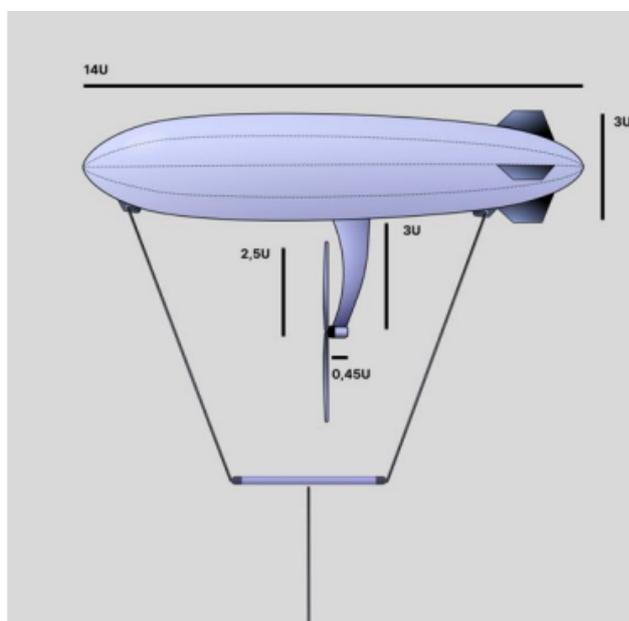
Desde o início do desenvolvimento desse conceito, alguns parâmetros foram estabelecidos como base para futuros estudos e pesquisas. O dirigível seria preenchido com gás inerte, como o hélio, uma escolha segura e eficiente, especialmente considerando que o projeto é voltado para a microgeração, o que implica em dimensões reduzidas. As primeiras proporções do dirigível foram definidas utilizando dados aerodinâmicos provenientes do Project AURORA: Autonomous Unmanned Remote Monitoring Robotic Airship, desenvolvido pelo Centro de Informática e Tecnologia da UNICAMP-SP. Esse projeto forneceu a base para definir as proporções a serem seguidas, o comprimento de 14 unidades de medida e um diâmetro médio de 3 unidades de medida, que podem ser convertidos

em escalas adequadas, como 14 cm e 3 cm ou 14 m e 3 m, dependendo da aplicação.

Com essas proporções iniciais em mente, um novo esboço do projeto foi criado, levando em consideração as dimensões de um gerador de 9 kW da empresa Tesup(figura 2), que possui 2,5 metros de diâmetro, 40 cm de hub e 20 kg de massa. Uma das principais vantagens desse modelo, o Magnum, é sua ampla faixa operacional, que varia entre 3 e 50 m/s, tornando-o adequado para uma grande variedade de condições atmosféricas. É importante destacar que, de acordo com o manual de instalação do fabricante, a distância mínima entre a haste de sustentação do gerador e as pás deve ser de 40 cm, o que foi levado em consideração no desenvolvimento do novo esboço.

Para otimizar a eficiência do sistema, as proporções do dirigível foram ajustadas. O comprimento foi ampliado para 18,41 unidades de medida e o diâmetro médio foi ajustado para 3,94 unidades, presente na figura 7, resultando em um volume total de aproximadamente 150 m³. Com essa nova configuração, ao utilizar gás hélio, o dirigível possui uma capacidade de elevação de cerca de 150 kg. Considerando que o gerador e as pás pesam 22,97 kg, o sistema conta agora com uma margem de 127,03 kg, que pode ser utilizada para acomodar os demais componentes, como cabos de transmissão, módulos eletrônicos e estruturas de controle. Esses ajustes asseguram que o sistema continue fisicamente viável e capaz de operar de maneira estável e segura em condições normais de vento.

Figura 7: Desenho de proporção



Com essa nova configuração, o Projeto Zephyrus se destaca como uma solução inovadora para a geração de energia por meio de turbinas aéreas, especialmente voltada para o mercado de microgeração. O dirigível não apenas oferece uma plataforma estável para o gerador operar em altitudes mais elevadas, onde a densidade do ar é menor, mas também elimina a necessidade de grandes infraestruturas fixas, como torres. No entanto, o sucesso desse projeto dependerá de soluções avançadas de controle eletrônico para manter o dirigível estável em condições de vento variável, e de materiais leves e duráveis para garantir que o sistema funcione por longos períodos sem comprometer sua integridade.

Além disso, o controle dinâmico da posição do dirigível em tempo real, ajustando altura e ângulo de inclinação com base em sensores que monitoram as condições atmosféricas, é essencial para o sucesso do projeto. Esse sistema permitirá ao dirigível se ajustar automaticamente, maximizando a captura de vento enquanto mantém a estabilidade do gerador. Esses avanços, aliados ao uso de materiais de última geração como fibras de carbono e polímeros reforçados, garantem não apenas a longevidade da estrutura, mas também uma operação mais eficiente, uma vez que esses materiais são leves, resistentes e capazes de suportar as condições climáticas extremas presentes em altitudes elevadas.

Com esse conceito inovador e os ajustes feitos no design do dirigível e do gerador, o Projeto Zephyrus promete ser uma solução viável e competitiva para a geração de energia limpa, atendendo às demandas de um mercado cada vez mais voltado para a sustentabilidade e a descentralização das fontes energéticas.

Para que o sistema de geração de energia seja eficiente, um dos componentes essenciais do Projeto Zephyrus é o cabo de força. Esse cabo desempenha um papel vital, pois é responsável por conduzir a energia gerada pelo aerogerador até o solo, e deve ser cuidadosamente escolhido para atender a uma série de critérios técnicos. Entre os principais fatores a serem considerados estão a capacidade de corrente, a resistência à tração axial, o isolamento e o peso do cabo.

A capacidade de corrente refere-se à quantidade de energia que o cabo pode transportar sem que ocorra aquecimento excessivo ou falhas. Como o gerador utilizado no projeto tem uma potência de 9 kW, o cabo deve ser capaz de suportar a corrente gerada de forma contínua, sem comprometer a eficiência ou a segurança do sistema. Além disso, o cabo deve apresentar resistência à tração axial, uma vez que será suspenso a uma altura de 200 metros e estará sujeito tanto ao seu próprio peso quanto às forças resultantes dos ventos em altitudes elevadas. Esse aspecto é crucial, pois qualquer falha na resistência mecânica pode comprometer a integridade do sistema.

Outro fator fundamental é o isolamento do cabo. Ele precisa ser capaz de resistir a diferentes condições climáticas e prevenir curtos-circuitos e choques elétricos, garantindo assim a segurança do sistema e das pessoas envolvidas em sua operação e manutenção. Por fim, o peso do cabo é um ponto crítico, já que o dirigível precisa sustentar o sistema completo. Um cabo muito pesado aumentaria a carga sobre o dirigível, exigindo mais gás hélio para mantê-lo flutuando, o que poderia elevar os custos e comprometer a viabilidade do projeto.

Diante desses requisitos, três opções de cabos foram analisadas: cabos de cobre revestidos de borracha e cabos de alumínio revestidos de polietileno. Os cabos de cobre são uma opção tradicional, com alta capacidade de corrente e boa resistência à tração. Estudos como o de Akindoyo et al. (2016) mostram que esses cabos são eficazes em aplicações de geração de energia renovável, sendo amplamente utilizados em turbinas eólicas convencionais. No entanto, o cobre é relativamente pesado, o que pode aumentar a carga total do sistema.

Por outro lado, os cabos de alumínio revestidos de polietileno oferecem uma solução mais leve, mantendo boa capacidade de corrente e excelente isolamento. Embora o alumínio tenha menor condutividade elétrica em comparação com o cobre, ele é significativamente mais leve, o que reduz a carga sobre o dirigível. Estudos como o de Kumar et al. (2017) destacam a eficácia dos cabos de alumínio em sistemas de geração de energia, especialmente em turbinas eólicas. Com um peso por metro menor que os cabos de cobre, se mostra, em princípio, viável para o Projeto Zephyru, atendendo aos requisitos de peso e desempenho.

Após analisar todas as opções, os cabos de alumínio revestidos de polietileno foram selecionados como a melhor alternativa para o Projeto Zephyrus. Além de serem 50% mais leves que os cabos de cobre, eles oferecem uma boa relação custo-benefício, mantendo a capacidade de corrente necessária para o gerador de 9 kW. Utilizando a ferramenta Calculate cable cross-section, power and amperage, determinou-se que um cabo de 200 metros de comprimento, com uma área transversal de 25 mm², atende às especificações do fabricante do gerador. O peso total estimado desse cabo é de 40 kg, o que se encaixa dentro da capacidade de elevação do dirigível.

Outro aspecto fundamental do Projeto Zephyrus é o casco do dirigível, que foi desenvolvido com base nas mais recentes inovações tecnológicas. A evolução da tecnologia de dirigíveis ao longo dos anos permitiu o uso de materiais mais leves e resistentes, capazes de suportar as condições adversas em altitudes elevadas. Existem três categorias principais de dirigíveis: rígidos, semirrígidos e infláveis. Cada um oferece vantagens e desvantagens que foram cuidadosamente avaliadas para determinar a melhor escolha para o projeto.

Dirigíveis rígidos, como o famoso Zeppelin, possuem uma estrutura interna robusta que mantém a forma do envelope, mesmo sem gás. Esses dirigíveis são extremamente duráveis, mas possuem o inconveniente de serem mais volumosos e difíceis de transportar e armazenar. Já os dirigíveis infláveis, como o Skyship 600 figura 8, dependem completamente do gás para manter sua forma. São leves, fáceis de armazenar e transportar, mas tendem a ser menos estáveis em condições de vento forte, a cima de 10 m/s.

Figura 8: Skyship 600



Fonte: <https://skyshipservices.com>

Para o Projeto Zephyrus, o modelo semirrígido foi escolhido como a melhor opção, combinando a durabilidade de uma estrutura interna parcial com a flexibilidade de um dirigível inflável. Esse tipo de dirigível oferece uma boa estabilidade em condições de vento moderado a forte, o que é essencial para manter o gerador na posição correta em altitudes elevadas. Além disso, sua estrutura leve permite o uso de materiais avançados, como fibra de vidro e polímeros reforçados com fibras, que proporcionam resistência e leveza, garantindo que o dirigível possa operar por longos períodos sem comprometer sua integridade.

O material do casco consiste em poliéster reforçado com uma camada de fibra de vidro, o que oferece robustez ao dirigível, enquanto a estrutura interna de alumínio proporciona leveza e resistência. A eficácia dessa combinação foi comprovada em

dirigíveis modernos, como o Zeppelin NT, e agora está sendo aplicada no novo Blimp da Goodyear presente na Figura 9, um exemplo claro de como essas inovações podem ser aplicadas em sistemas de geração de energia. O desenvolvimento do dirigível Zephyrus está sendo orientado por um modelo 3D em escala, que permite a otimização de cada detalhe do projeto, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 9 - Dirigível semi-rígido Goodyear Blimp



fonte: <https://www.goodyearblimp.com>

Figura 10 - Modelo 3D otimizado



Fonte: Autor

A turbina eólica escolhida para o novo design do sistema AWT (Airborne Wind Turbine) é baseada no modelo Tesup de 9 kW, que se destaca por sua eficiência e robustez. Esse modelo foi pensado como possibilidade devido às suas características de alta performance e sua adequação para operações em altitudes elevadas, onde os ventos são mais fortes e constantes. O sistema completo da turbina inclui três pás fabricadas em materiais compósitos leves e extremamente resistentes, cada uma com um comprimento de 2,35 metros. O peso individual de cada pá é de aproximadamente 990 g, resultando em um peso total de 2,97 kg para as pás combinadas.

Somando-se ao rotor e ao gerador, que pesam 20 kg, o peso total da turbina chega a 22,97 kg. Esse design leve é um fator crucial para um sistema suspenso como o Projeto Zephyrus, uma vez que a redução de peso alivia a carga sobre o dirigível, permitindo maior eficiência no levantamento e maior capacidade de carga para outros componentes essenciais. A turbina foi projetada para operar em altitudes elevadas, com uma faixa operacional de velocidade do vento que varia entre 3 m/s e 50 m/s, o que proporciona uma flexibilidade significativa em diferentes condições atmosféricas. Além disso, a turbina é capaz de atingir rotações de até 2000 RPM, convertendo a energia cinética do vento em eletricidade.

O dirigível, que atua como a base suspensa para a turbina, proporciona a estabilidade necessária para minimizar oscilações e perdas de eficiência causadas por variações repentinas no vento. A aerodinâmica otimizada do Zephyrus também reduz o arrasto, permitindo que o sistema aproveite ao máximo o potencial energético do vento. Essa configuração é fundamental para garantir que o sistema funcione de maneira eficiente, mesmo em condições adversas, enquanto aproveita os ventos mais consistentes encontrados em altitudes elevadas.

Além de seu design aerodinâmico, a turbina é equipada com um controlador de carga que ajusta e regula a saída de tensão elétrica entre 24V e 48V, dependendo da demanda de energia. Isso assegura uma transmissão eficiente da energia gerada para o solo por meio de cabos de alta resistência. Esses cabos não apenas

transportam a eletricidade, mas também são dimensionados para suportar o peso da turbina e as forças mecânicas geradas pelos ventos em altitudes elevadas.

O design modular e leve da turbina permite que ela seja reposicionada conforme as condições climáticas, garantindo que a eficiência do sistema seja mantida mesmo em situações adversas. O objetivo principal deste projeto é maximizar a geração de energia eólica, minimizando ao mesmo tempo o impacto ambiental e a necessidade de infraestruturas fixas, como aquelas utilizadas em turbinas eólicas terrestres tradicionais.

Em resumo, a integração da turbina eólica Tesup de 9 kW ao sistema AWT proposto no Projeto Zephyrus resulta em uma possível operação eficiente em altitudes elevadas, onde os ventos mais firmes e constantes. Essa combinação de flexibilidade, robustez e eficiência torna o sistema ideal para aplicações de microgeração distribuída, atendendo às crescentes demandas por fontes de energia renovável e sustentáveis.

Embora o Projeto Zephyrus seja classificado como um sistema de geração de energia aérea (*airborne generation*), ainda é necessária uma estrutura em solo para apoiar operações críticas, como decolagem, pouso e transferência eficiente da energia elétrica gerada. Essa estrutura no solo, chamada de Base Operacional, precisa ser robusta o suficiente para lidar com as demandas mecânicas e elétricas associadas ao sistema, mas ao mesmo tempo simples e funcional, permitindo um uso prático em diferentes ambientes.

Um dos componentes fundamentais da Base Operacional é o sistema de retração e enrolamento do cabo de força, que deve ser capaz de suportar a descida e subida do dirigível sem comprometer a integridade do cabo ou causar sobrecarga na estrutura. Para isso, a instalação de um guincho elétrico, projetado para enrolar e desenrolar o cabo de força de forma suave e controlada, é essencial. Esse guincho será equipado com sensores de tensão para evitar sobrecarga no cabo durante o movimento, garantindo que o cabo seja enrolado sem danos e sem criar riscos à transmissão de energia.

Além disso, a Base Operacional deverá incluir um sistema de aterramento seguro, essencial para garantir que a energia gerada pela turbina seja corretamente

canalizada para o solo e integrada à rede elétrica local sem risco de sobrecarga ou choques. Esse sistema precisará lidar com a tensão transmitida pelos cabos da turbina, garantindo segurança tanto na operação quanto na manutenção do sistema.

Outro aspecto importante da Base é sua capacidade de suportar o pouso e decolagem do dirigível. Plataformas de pouso automatizadas e sistemas de guia podem ser implementados para garantir que o dirigível mantenha sua estabilidade durante essas fases críticas. Sensores de proximidade podem ser utilizados para auxiliar na aproximação do dirigível à base, evitando colisões ou erros durante o pouso. O uso de mecanismos de ancoragem permitirá que o dirigível seja fixado com segurança ao solo em momentos de necessidade, especialmente em condições adversas de vento. Esses mecanismos também facilitarão a decolagem, garantindo que o dirigível seja liberado gradualmente e de forma controlada, evitando tensões excessivas nos cabos e na estrutura.

Com essas adições, a Base Operacional se torna um elemento essencial para o sucesso do Projeto Zephyrus, fornecendo o suporte necessário para as operações aéreas, enquanto garante a segurança e eficiência na transferência de energia para a rede elétrica. Uma solução modular e transportável também deve ser considerada, permitindo que o sistema seja movido e instalado em diferentes locais, conforme as necessidades de geração de energia variem.

Os controles eletrônicos são um dos pilares fundamentais para a estabilidade e operação segura do Projeto Zephyrus. Dada a natureza aérea do sistema, os controles precisam ser capazes de gerenciar uma ampla gama de fatores em tempo real, garantindo que o dirigível e a turbina permaneçam estáveis e operem de maneira eficiente, independentemente das condições atmosféricas.

O coração do sistema de controle é um Raspberry Pi, programado especificamente para atuar como o centro de comando do dirigível. Esse dispositivo gerencia a coleta de dados de diversos sensores instalados na estrutura, incluindo sensores de velocidade do vento, temperatura, altitude e posição geográfica. Com base nesses dados, o Raspberry Pi ajusta automaticamente as operações do dirigível e da turbina, garantindo que o sistema opere na configuração mais eficiente a cada

momento. Esse ajuste automático permite que o Projeto Zephyrus opere de maneira autônoma, sem a necessidade de intervenção constante de operadores humanos.

Um dos principais componentes controlados eletronicamente são os servomotores que ajustam os flaps e outras superfícies de controle aerodinâmico no dirigível. Esses servomotores permitem pequenas correções de curso e inclinação, garantindo que o dirigível se mantenha estável e na altitude correta, mesmo em condições de vento variável. Essas correções são fundamentais para manter o gerador em uma posição ideal para captar o máximo de energia do vento. O sistema é programado para reagir a mudanças repentinas nas condições atmosféricas, como rajadas de vento ou mudanças na direção do vento, ajustando rapidamente os flaps e garantindo que a turbina permaneça eficiente e estável.

Além dos servomotores, o sistema também controla as fases de decolagem e pouso do dirigível. Durante a decolagem, o controle eletrônico ajusta a velocidade de subida e monitora as condições do vento para garantir que o dirigível alcance a altitude desejada de forma segura e controlada. Durante o pouso, o sistema coordena a descida, ajustando a inclinação e a velocidade do dirigível para garantir um pouso suave, minimizando o risco de danos tanto ao dirigível quanto à base.

Outro aspecto importante do controle eletrônico é a gestão da energia gerada pela turbina. O Raspberry Pi regula o controlador de carga da turbina, ajustando a saída de tensão entre 24V e 48V, dependendo da demanda e das condições de operação. Isso garante que a energia seja transferida para a base de maneira eficiente e segura, sem sobrecarregar os sistemas de transmissão ou causar perda de energia.

Por fim, o sistema de controle também incorpora um mecanismo de segurança redundante. Caso ocorra alguma falha em um dos sensores ou componentes do dirigível, o sistema é programado para acionar automaticamente uma série de protocolos de segurança, que podem incluir a descida controlada do dirigível até uma altitude segura ou até o pouso completo na base. Além disso, o Raspberry Pi é capaz de comunicar-se com uma estação de controle em solo, permitindo que operadores humanos monitorem e intervenham manualmente, se necessário.

Em termos de desenvolvimento, o design dos controles eletrônicos foi baseado no trabalho de Automação e Controle Eletrônico de Airborne Wind Turbines: Implementação no Projeto Zephyrus (TELLES, 2024), que forneceu uma base sólida para a implementação de sistemas de controle em veículos aéreos não tripulados. A integração desses sistemas no Projeto Zephyrus garante que o dirigível possa operar de maneira autônoma e eficiente, mesmo em condições desafiadoras, maximizando a segurança e a geração de energia.

4. ENGENHARIA RELACIONADA À AERODINÂMICA

O desempenho do novo design proposto para a AWT é diretamente influenciado pelas características aerodinâmicas da estrutura do dirigível e da turbina acoplada. O dirigível não só fornece sustentação adicional para manter o sistema suspenso no ar, mas também ajuda a minimizar a turbulência ao redor da turbina, permitindo um fluxo de ar mais constante e eficiente. Para isso, foram realizados cálculos aerodinâmicos detalhados, considerando o efeito de diversos perfis de vento em diferentes altitudes.

A estabilidade do dirigível é garantida por um sistema eletrônico de controle de inclinação das superfícies de sustentação, ajustando automaticamente a orientação da turbina para maximizar a captação de vento. As simulações aerodinâmicas indicam que esse controle ativo pode aumentar a eficiência do sistema em até 20%, dependendo das condições atmosféricas.

Além disso, a seleção dos materiais é fundamental para garantir a durabilidade e o desempenho do sistema. O uso de materiais compostos leves, como fibra de carbono, nas pás da turbina, combinado com o uso de polímeros reforçados no casco do dirigível, reduz o peso total do sistema, permitindo uma maior capacidade de geração de energia sem comprometer a resistência estrutural.

Força de Arrasto

A força de arrasto, que atua contra o movimento do sistema, é calculada pela equação:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A V^2 \quad (1)$$

Com um coeficiente de arrasto $C_D = 0.05$ para o perfil aerodinâmico do zepelim advindo do projeto AURORA e a área $A = 12,19 \text{ m}^2$, foi calculado para três velocidades do vento que podem ocorrer para dar uma noção do intervalo de força de arrasto que pode ser aplicada ao sistema

Cálculos para diferentes velocidades:

Para $V = 10 \text{ m/s}$:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot 0,05 \cdot 1,225 \cdot 12,19 \cdot (10)^2 = 37,34 \text{ N} \quad (1.1)$$

Para $V = 15 \text{ m/s}$:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot 0,05 \cdot 1,225 \cdot 12,19 \cdot (15)^2 = 84,01 \text{ N} \quad (1.2)$$

Para $V = 25 \text{ m/s}$:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot 0,05 \cdot 1,225 \cdot 12,19 \cdot (25)^2 = 233,37 \text{ N} \quad (1.3)$$

Resultados:

- Para 10 m/s: A força de arrasto é 37,34 N.
- Para 15 m/s: A força de arrasto é 84,01 N.
- Para 25 m/s: A força de arrasto é 233,37 N.

Essa força de arrasto é pequena em comparação com a força de sustentação, indicando que a AWT poderá operar de maneira eficiente. Contudo esta força tem grande impacto na força total que o cabo deve sustentar para que o sistema se mantenha íntegro.

Cálculo da Tensão no Cabo

Os cabos que conectam a AWT ao solo devem resistir a força de arrasto, para conseguir calcular se o cabo escolhido resistiria foram realizados os cálculos:

A força total no cabo (T) será a soma vetorial do peso dos componentes e da força de arrasto. A equação para a tensão total é:

$$T = \sqrt{W^2 + F_D^2} \quad (2)$$

Onde W é a força de empuxo e F arrasto.

Substituindo os valores:

$$T = \sqrt{(1471,5)^2 + (233,37)^2} \quad (2.1)$$

Calculando o valor:

$$T = \sqrt{2166362,25 + 54461,16} \approx \sqrt{2220823,41} \approx 1489,89 \text{ N} \quad (2.2)$$

De acordo com o ASM Handbook, Volume 2 ligas como 1350-H19, usada para cabos elétricos, a resistência à tração fica em torno de 90 MPa ou 90 N/mm², como estamos utilizando um cabo de seção transversal de 25mm² a força máxima que um cabo de alumínio pode suportar é calculada pela fórmula:

$$F_{\text{máxima}} = \text{resistência à tração} \times \text{área da seção transversal} \quad (2.2)$$

Substituindo os valores:

$$F_{\text{máxima}} = 90 \text{ N/mm}^2 \times 25 \text{ mm}^2 = 2250 \text{ N} \quad (2.3)$$

Desta forma é provado que o cabo escolhido possui com boa margem a capacidade de ancorar o sistema com eficiência e segurança.

5. ATUAÇÃO DO PROJETO E GERAÇÃO DE ENERGIA ESPERADA

A análise dos ventos e a configuração do dirigível Zephyrus foram projetadas para operar de forma otimizada a 200 metros de altura. Essa altitude oferece condições de vento mais consistentes e intensas em relação à superfície, o que permite o aproveitamento de ventos com características favoráveis, mesmo em áreas urbanas e suburbanas. De acordo com estudos realizados sobre a avaliação de recursos eólicos em ambientes urbanos, os ventos a essa altura podem ser bastante influenciados pela presença de construções, que alteram a intensidade e a turbulência do vento, especialmente em áreas densamente povoadas (PAULA et al., 2022).

A escolha por um sistema de microgeração eólica, associado à operação em maiores altitudes, possibilita a captura de ventos com velocidades variando entre 3 a 25 m/s ao longo do ano. Em áreas suburbanas e rurais, as velocidades médias dos ventos tendem a ser mais favoráveis durante o outono e o inverno, com valores médios superiores a 15 m/s nessas estações, enquanto durante o verão e a primavera, observa-se uma ligeira diminuição, mas ainda com ventos adequados para a geração de energia (SOUZA, 2023).

Para o cálculo da operação da turbina eólica do Zephyrus, foram consideradas três faixas de velocidade representativas: 10 m/s, 15 m/s e 25 m/s. Nessas condições, o sistema gerador de 9 kW da Tesup pode operar de maneira otimizada, maximizando a eficiência na captação de energia eólica, especialmente em regiões onde os ventos são favorecidos pela menor presença de obstáculos físicos e pela altitude (PAULA et al., 2022).

Com base nos perfis de vento estimados para a altitude de 200 metros e levando em consideração a eficiência do gerador, as previsões anuais de geração de energia indicam uma produção de até 50 MWh/ano. Durante os meses mais frios, como o

outono e inverno, a produção energética tende a ser superior, dada a maior intensidade dos ventos nessas estações. Nos períodos mais quentes, como primavera e verão, a geração pode sofrer uma ligeira redução, mas ainda mantendo níveis satisfatórios, o que garante o fornecimento constante de energia ao longo do ano (SILVA, 2022).

O projeto Zephyrus idealmente oferece diversas vantagens para a geração distribuída de energia. Operando a 200 metros de altura, o sistema é capaz de captar ventos mais estáveis e intensos, garantindo a operação eficiente do gerador, mesmo em condições de vento moderado. A sustentação do dirigível por gás hélio, um gás inerte e não inflamável, assegura a segurança do sistema e elimina a necessidade de grandes infraestruturas físicas no solo (PAULA et al., 2022). Além disso, a modularidade do sistema permite uma instalação rápida e com baixa interferência no ambiente local, seja em áreas urbanas, suburbanas ou rurais, possibilitando o ajuste do sistema conforme as necessidades do local de instalação (SOUZA, 2023).

Esses fatores reforçam a possível viabilidade do sistema de microgeração eólica Zephyrus, destacando suas vantagens operacionais e ambientais, além de seu potencial para atender às demandas energéticas de forma sustentável e com baixo impacto ao longo do ano (SILVA, 2022).

5-1. CUSTO ESPERADO PARA O PROJETO

A estimativa de custo preliminares para o desenvolvimento do sistema de microgeração eólica Zephyrus leva em consideração os principais componentes necessários para sua implementação, bem como a infraestrutura de suporte e instalação. O objetivo é fornecer uma visão superficial porém clara dos valores envolvidos na construção e operação do sistema, comparando-os com os custos de instalação de aerogeradores tradicionais de microgeração.

O gerador principal utilizado no projeto é o modelo de 9 kW da Tesup, cujo custo estimado é de R\$ 8.000,00. Este gerador apresenta uma excelente relação custo-benefício, dada a sua eficiência operacional em uma faixa de vento ampla, entre 3 a 50 m/s, o que o torna ideal para a aplicação em altitudes elevadas, como os 200 metros de operação planejada para o dirigível Zephyrus.

Além do gerador, outro componente significativo no projeto é o dirigível em si, que será responsável pela sustentação de todo o sistema. O valor de R\$ 20.000 foi estimado, esse valor cobre a fabricação de um dirigível com 18,41 metros de comprimento e 3,94 metros de diâmetro, construído com materiais leves e duráveis, como a fibra de carbono, que proporcionam segurança e resistência para longos períodos de operação bem como a implementação dos sistema eletrônicos embarcados para manutenção do mesmo. A quantidade de hélio necessária para encher o dirigível (aproximadamente 150 m³) representa um custo estimado de R\$ 6.241,00, com o restante do valor dedicado à estrutura, cabos, e aos componentes eletrônicos responsáveis pelo controle e monitoramento da estabilidade e do desempenho do sistema.

Os cabos de transmissão de energia, que conectam o sistema ao solo, são uma parte essencial do projeto. Para este projeto, foi escolhido um cabo de alumínio com seção transversal de 25 mm², cujo custo médio é de aproximadamente R\$ 20,00 por metro. Considerando que o sistema operará a 200 metros de altura, o custo total estimado preliminarmente dos cabos seria de aproximadamente R\$ 4.000,00.

Além dos componentes principais, há custos relacionados à instalação e manutenção do sistema, que incluem o transporte e montagem do dirigível, além da infraestrutura elétrica necessária para conectar o sistema à rede de distribuição de energia. Esses custos adicionais estão estimados em cerca de R\$ 10.000,00, considerando o uso de mão de obra especializada e o equipamento necessário para a instalação.

A tabela a seguir resume os principais custos estimados do projeto:

Componente	Valor Estimado (R\$)
Estrutura do dirigível (fibra de carbono)	R\$ 20.000,00
Gerador de 9 kW Tesup	R\$ 8.000,00
Cabos de transmissão (200 metros)	R\$ 4.000,00
Gás Hélio (150 m ³)	R\$ 6.241,00
Instalação	R\$ 8.000,00
Total	R\$ 46.241,00

A comparação entre o sistema Zephyrus e um aerogerador convencional de microgeração evidencia uma possível viabilidade financeira e operacional do projeto. Um aerogerador de microgeração terrestre com potência equivalente (em torno de 9 kW) custa, em média, R\$ 25.000,00 a R\$ 35.000,00 para compra onde é comprado gerador + pás + torre, com valores adicionais de R\$ 15.000,00 a R\$ 20.000,00 para instalação devido a mão de obra especializada necessária e equipamentos de grande porte. Assim, o custo total para a instalação de um aerogerador terrestre seria de aproximadamente R\$ 45.000,00 a R\$ 55.000,00.

Embora o custo inicial, mesmo que focado apenas nos sistemas principais, do sistema Zephyrus seja semelhante ao de um aerogerador tradicional, o projeto oferece uma série de vantagens adicionais. Entre elas, destaca-se a flexibilidade de instalação em locais com pouca ou nenhuma infraestrutura, além de operar a altitudes elevadas, onde os ventos são mais constantes e intensos. Essa característica reduz o tempo necessário para atingir a capacidade máxima de geração de energia e aumenta a eficiência ao longo do tempo. Ademais, a manutenção do sistema é relativamente mais simples e barata, uma vez que não envolve grandes estruturas fixas no solo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O design proposto, que combina a tecnologia de aerogeradores com dirigíveis, é inovador e, como tal, enfrentará desafios inerentes a qualquer nova tecnologia. A resistência dos materiais, especialmente sob condições climáticas adversas, é uma preocupação. A eficiência do gerador em altitudes elevadas, onde a densidade do ar é menor, também precisa ser avaliada. Além disso, a integração de sistemas de controle para manter o dirigível estável em diferentes condições de vento é um desafio técnico significativo. Um desafio técnico adicional é a força de tração no cabo. Considerando que o dirigível estará a uma altitude elevada, o cabo precisará suportar não apenas o peso do gerador e do próprio cabo, mas também as forças dinâmicas induzidas pelo vento e pelo movimento do dirigível. A força de tração no cabo pode ser calculada usando princípios básicos da física, levando em consideração a massa do gerador, a massa do cabo por unidade de comprimento, a altitude do dirigível e as forças de vento. A manutenção do funcionamento com estabilidade na posição é outro desafio técnico. O dirigível precisa permanecer em uma posição estável para garantir a eficiência máxima da geração de energia. Qualquer desvio significativo de sua posição ideal pode resultar em perdas de eficiência. Além disso, a manutenção do sistema em altitudes elevadas pode apresentar desafios logísticos. Acessar o gerador e o dirigível para manutenção regular ou reparos pode ser mais complicado do que acessar turbinas eólicas terrestres tradicionais.

No entanto, estudos recentes têm mostrado avanços em tecnologias relacionadas, indicando que soluções viáveis podem ser desenvolvidas para superar esses desafios. Por exemplo, pesquisas sobre a missão Soil Moisture Active Passive (SMAP) têm explorado tecnologias avançadas para monitorar e responder a condições ambientais em altitudes elevadas, o que pode fornecer insights valiosos para o design proposto (ENTEKHABI et al., 2010).

Além disso, a flexibilidade do design permite que o sistema seja implementado em locais onde as turbinas eólicas tradicionais podem não ser viáveis. A combinação de materiais leves e avançados, como nanotubos de carbono, pode melhorar ainda mais a eficiência e a durabilidade do sistema (DE VOLDER et al., 2013).

Outro ponto forte é a capacidade desses sistemas de realizar medições in-situ da temperatura, umidade e vento com alta precisão e resolução. Isso foi demonstrado por sistemas de aeronaves remotamente pilotadas, como o MASC (Multipurpose Airborne Sensor Carrier). Originalmente projetado para pesquisa da camada limite atmosférica, esse tipo de aeronave mostrou-se capaz de operar próximas a turbinas eólicas, coletando dados valiosos sobre o fluxo de entrada e o rastro das turbinas.

A capacidade de coletar dados em tempo real e com alta precisão pode ser uma ferramenta valiosa na otimização e monitoramento do desempenho do aerogerador, permitindo ajustes em tempo real e melhorando a eficiência geral do sistema.

Enquanto as turbinas eólicas tradicionais têm sido a norma para a geração de energia eólica, o design proposto oferece uma abordagem alternativa que pode superar algumas das limitações das tecnologias existentes. A capacidade de operar em altitudes mais elevadas e em locais variados oferece uma vantagem distinta sobre as soluções tradicionais. No entanto, é essencial comparar a eficiência, os custos operacionais e a viabilidade a longo prazo, através de estudos aplicados onde protótipos sejam testados em comparação com as tecnologias existentes para determinar o verdadeiro potencial do design proposto.

O uso de sistemas eólicos em áreas urbanas tem sido uma área de interesse crescente, pois a proximidade dos usuários de eletricidade pode resultar em uma eficiência global melhorada e economia de território. Um sistema eólico que utiliza o telhado de um edifício em combinação com uma turbina centrípeta foi proposto como uma solução para explorar a energia eólica em ambientes urbanos. Este design pode ser visto como um amplificador de velocidade do vento, permitindo a geração de energia em velocidades de vento mais baixas e mais altas do que os aerogeradores convencionais (CARCANGIU & MONTISCI, 2012).

Além disso, estudos indicam que muitas áreas urbanas têm condições climáticas que podem ser favoráveis à geração de energia eólica. Por exemplo, a utilização de energia eólica em áreas urbanas densamente povoadas pode não apenas fornecer energia, mas também reduzir as emissões de carbono, contribuindo assim para esforços globais de sustentabilidade (MERTENS, 2002).



Fonte: <https://ufsckite.ufsc.br/>

Outro aspecto importante é a capacidade de atender às necessidades de residências que estão fora da rede elétrica. Estima-se que muitas residências rurais em todo o mundo ainda não estão conectadas à rede elétrica. O uso de sistemas de energia renovável, como o design proposto, pode fornecer uma solução viável para eletrificar essas residências, melhorando a qualidade de vida e promovendo o desenvolvimento sustentável (CHAUREY & KANDPAL, 2010).

Em 2012, a Universidade Federal de Santa Catarina deu início a uma iniciativa com o objetivo de desenvolver um protótipo de aerogerador com capacidade de 12kW, que utiliza a tecnologia de aerofólio fixado por cabos. Paralelamente, o projeto também visou criar um protótipo para uma estação autônoma de monitoramento do perfil de vento, com um alcance de 0 a 600 metros de altitude e de custo reduzido. Esta estação tem como propósito identificar regiões com potencial econômico favorável para a implementação dos aerogeradores projetados. O Projeto UFSCkite, figura 10, como é chamado então produziu uma AWT de base fixa no chão utilizando um parapente de planador, a base do modelo pode ser vista na figura 4 anteriormente apresentada. Dos mais de 55 grupos de pesquisa no mundo sobre AWE, o projeto UFSCkite é o pioneiro e único da América latina. Ao longo dos anos

o projeto percebeu o crescente mercado e decidiu em 2023 tornar-se uma startup para facilitar os investimentos externos e alavancar ainda mais o desenvolvimento da tecnologia.

A implementação do projeto Zephyrus, que combina tecnologias de aerogeradores e dirigíveis para microgeração eólica, apresenta resultados promissores. O sistema, projetado para operar a 200 metros de altura, acessa ventos mais vigorosos e regulares em comparação com turbinas terrestres convencionais. Estudos demonstram que essa altitude é ideal para a captação de ventos com velocidades entre 10 e 25 m/s, o que proporciona um aumento significativo na eficiência da geração de energia (WILLIAMS et al., 2008). A escolha por um sistema de geração em altitudes elevadas resolve, em parte, o problema da variação de intensidade do vento ao nível do solo, especialmente em áreas urbanas e suburbanas, onde as condições atmosféricas podem ser imprevisíveis (SOUZA, 2023).

As simulações realizadas indicam que o sistema pode operar de maneira eficiente em faixas de velocidade de vento de 10 m/s, 15 m/s e 25 m/s, resultando em uma produção anual estimada de até 50 MWh. O dirigível, que utiliza gás hélio para sustentação, foi projetado para resistir a diferentes forças de arrasto. Em ventos de 15 m/s, por exemplo, o arrasto foi calculado em 43,06 N, um valor gerenciável pelos materiais compostos utilizados na construção, como a fibra de carbono e os polímeros reforçados. Esses materiais contribuem para a leveza e durabilidade do sistema, reduzindo as perdas de eficiência causadas pela resistência ao ar (DE VOLDER et al., 2013).

Além da eficiência energética, o projeto Zephyrus destaca-se pela flexibilidade de instalação, permitindo que o sistema seja implementado em áreas onde as turbinas eólicas tradicionais seriam inviáveis. Essa versatilidade é particularmente útil em regiões urbanas e rurais isoladas, onde o uso de aerogeradores convencionais encontra limitações devido à falta de espaço ou à infraestrutura necessária. O uso de dirigíveis permite a instalação em locais mais restritos e a captação de ventos em altitudes onde eles são mais fortes e constantes (CARCANGIU & MONTISCI, 2012).

Os custos estimados para a implementação do sistema são competitivos em relação às tecnologias tradicionais. O custo total do Zephyrus é de aproximadamente R\$

46.241,00, incluindo o gerador eólico (R\$ 8.000,00), o dirigível (R\$ 20.000,00) e os cabos de transmissão (R\$ 4.000,00). Comparado a sistemas terrestres de microgeração, que podem variar entre R\$ 45.000,00 e R\$ 55.000,00, o Zephyrus oferece uma solução mais acessível, além de permitir economia em termos de infraestrutura física, já que a estrutura flutuante não demanda grandes fundações ou torres (CHAUREY & KANDPAL, 2010).

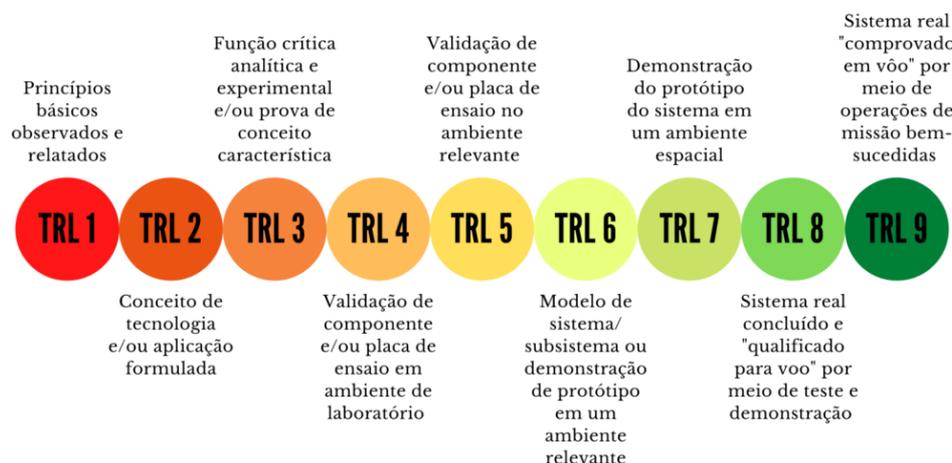
Outro fator crucial para o sucesso do projeto é a robustez do sistema de cabos que conecta o dirigível ao solo. Os cálculos mostraram que os cabos de alumínio revestidos de polietileno são capazes de suportar forças de tração de até 2250N, assegurando a integridade estrutural mesmo sob ventos fortes e outras condições adversas (KUMAR et al., 2017). Esse fator, aliado ao uso de controles eletrônicos avançados que ajustam automaticamente a orientação das pás da turbina de acordo com as condições atmosféricas, maximiza a eficiência aerodinâmica e garante que o sistema opere de forma otimizada, independentemente das variações do vento (VAN DER VLUGT et al., 2019).

A manutenção e a logística de operação em altitudes elevadas são desafios inerentes ao design inovador do sistema. O acesso ao dirigível para reparos ou ajustes é mais complicado em comparação com turbinas convencionais, mas o uso de materiais leves e duráveis, como a fibra de carbono, minimiza a necessidade de manutenções frequentes, contribuindo para a viabilidade do sistema a longo prazo. Além disso, sistemas de monitoramento remoto, como os utilizados em aeronaves remotamente pilotadas, podem ser adaptados para o Zephyrus, permitindo a coleta de dados em tempo real sobre as condições atmosféricas e o desempenho da turbina, o que melhora a capacidade de manutenção preventiva e otimiza o funcionamento do sistema (MERTENS, 2002).

Por fim, a capacidade de geração de energia do Zephyrus em áreas remotas e urbanas densamente povoadas, bem como sua flexibilidade de operação em diferentes condições climáticas, indicam que o sistema pode ser uma alternativa eficiente e sustentável às turbinas eólicas tradicionais. A aplicação desse tipo de tecnologia pode contribuir para a eletrificação de áreas isoladas, onde o acesso à energia ainda é limitado, além de auxiliar na redução das emissões de carbono em áreas urbanas ao fornecer uma fonte de energia renovável local (CAO et al., 2016).

As simulações e cálculos teóricos indicam que o Projeto Zephyrus possui potencial para operar em diferentes cenários, especialmente em regiões urbanas ou de difícil acesso. No entanto, é importante destacar que este trabalho se encontra nos estágios iniciais de desenvolvimento tecnológico, classificados entre os níveis TRL 1 e 2 (Technology Readiness Level, figura 11). Nesse estágio, as pesquisas estão focadas na formulação teórica e nos primeiros estudos de viabilidade, sem que protótipos ou testes em campo tenham sido realizados. Avançar para estágios mais elevados de maturidade tecnológica (TRL 3 e superiores) requererá a construção de protótipos e a realização de experimentos que comprovem a aplicabilidade do conceito em escala real.

Figura 11: Escala de TRL



Fonte: Adaptado de Mankins (1995)

7. CONCLUSÃO

Este estudo explorou de maneira abrangente o potencial da microgeração eólica por meio da utilização de turbinas aéreas, posicionadas dentro do contexto de geração

distribuída de energia. Ao longo do desenvolvimento e análise de um projeto inovador, denominado Projeto Zephyrus, foi possível indicar não apenas a uma possível viabilidade técnica dessas turbinas, mas também seus impactos positivos no âmbito social e ambiental.

Os resultados obtidos sugeriram que as turbinas aéreas podem representar uma solução eficaz para diversos desafios impostos pela instalação de turbinas convencionais, especialmente em ambientes urbanos e rurais. A capacidade de operar em altitudes elevadas, aproveitando ventos mais consistentes e intensos, favorece que essas turbinas superem barreiras geográficas e estruturais que frequentemente limitam a instalação de turbinas terrestres. Suas características intrínsecas, como menor ruído e potencialmente menor impacto visual, podem contribuir para uma aceitação pública mais ampla, embora isso ainda precise ser plenamente validado através de estudos de campo.

A pesquisa também destacou a importância de políticas públicas e incentivos econômicos para viabilizar e acelerar a adoção dessas tecnologias emergentes. Embora a tecnologia de turbinas aéreas apresente desafios técnicos e econômicos — como a necessidade de melhorias em sistemas de armazenamento de energia para mitigar os efeitos da intermitência dos ventos —, concluiu-se que esses obstáculos podem ser superados por meio de investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento. A colaboração entre governos, indústrias e instituições de pesquisa será fundamental para fomentar inovações que aumentem a eficiência e a competitividade dessa tecnologia.

Outro aspecto abordado foi o potencial das turbinas suspensas para democratizar a produção de energia, ao permitir que pequenas comunidades e até mesmo indivíduos possam gerar sua própria eletricidade de maneira sustentável. Isso promove a descentralização da geração de energia, o que não só melhora a resiliência das redes elétricas ao reduzir a dependência de grandes centrais de geração, como também capacita as comunidades locais a desempenharem um papel ativo na transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Por fim, conclui-se que as turbinas aéreas apresentam uma solução promissora e viável para expandir a geração de energia renovável. Sua flexibilidade operacional, aliada a características que favorecem a aceitação social e a integração ambiental, torna essa tecnologia um ponto relevante para o futuro das energias limpas. A implementação dessas turbinas pode ajudar a atender às crescentes demandas por fontes renováveis, ao mesmo tempo em que promove o desenvolvimento sustentável e a descarbonização das matrizes energéticas, elementos essenciais para mitigar as mudanças climáticas e construir um futuro mais resiliente e equitativo.

8. REFERÊNCIAS

AHMED, Fadwa; SCHMEHL, Roland. Airborne Wind Energy: Optimal Design and Control of Pumping Kite Power Systems. Springer, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-73444-6>. Acesso em: 1 set. 2024.

AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION (AWEA). Wind Energy and Innovation. Disponível em: <https://www.awea.org>. Acesso em: 24 out. 2024.

ANDERSSON, Joel et al. CasADi: a software framework for nonlinear optimization and optimal control. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2018. Disponível em: <link>.

ARCHER, Cristina L.; CALDEIRA, Ken. Global Assessment of High-Altitude Wind Power. *Energies*, v. 2, n. 2, p. 307-319, 2009. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/2/2/307>. Acesso em: 1 set. 2024.

ASM Handbook, Volume 2 .Disponível em:http://sme.vimaru.edu.vn/sites/sme.vimaru.edu.vn/files/volume_2_-_properties_and_selection_nonf.pdf

BARRIAS, António; CASAS, Joan R.; VILLALBA, Sergi. A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications. *Sensors*, 2016. Disponível em: <link>.

BECKER, Rolf; KOOPMANN, Stefan; LOHMANN, Michael. Airborne Wind Energy Systems: A Review of the Technologies. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 753, p. 1-10, 2016. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/753/8/082001>. Acesso em: 1 set. 2024.

CARCANGIU, Sara; MONTISCI, Augusto. A building-integrated eolic system for the exploitation of wind energy in urban areas. 2012. Disponível em: <link>.

CAO, Xiaodong et al. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, 2016. Disponível em: <link>.

CHAUREY, Akanksha; KANDPAL, Tara C. A techno-economic comparison of rural electrification based on solar home systems and PV microgrids. 2010. Disponível em: <link>.

Cherubini, Antonello & Papini, Andrea & Vertechy, Rocco & Fontana, Marco. Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 51. 1461-1476. 10.1016. 2015.

DE VOLDER, Michael et al. Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications. *Science*, 2013. Disponível em: <link>.

EBRAHIMI, H.; ABAPOUR, M.; MOHAMMADI-IVATLOO, B.; GOLSHANNAVAZ, S.; YAZDANINEJADI, A. Decentralized approach for security enhancement of wind-integrated energy systems coordinated with energy storages. *International Journal of*

Energy Research, 46, p. 5006-5027, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/er.7494>.

ENTEKHABI, Dara et al. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, n. 5, maio 2010. Disponível em: <link>.

FAGIANI, Riccardo; DARIO, Alessandro; SMITH, Ryan. Airborne Wind Energy: Advances in the Development of Kite Power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 107, p. 455-468, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119300844>. Acesso em: 1 set. 2024.

HOUCHI, Jamal et al. A Review of Airborne Wind Energy Systems and Current Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 158, p. 112-122, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122002116>. Acesso em: 1 set. 2024.

IGNATYEV, Igor A.; THIELEMANS, Wim; VANDER BEKE, Bob. Recycling of Polymers: A Review. *ChemSusChem*, 2014. Disponível em: <link>.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Wind energy technology. Disponível em: <https://www.irena.org/wind>. Acesso em: 12 out. 2024.

MAIER, Matthias; KORSMEYER, David; MUSIAL, Walt. Airborne Wind Energy Technology. In: *Renewable Energy in the Service of Mankind*, v. 1, Springer International Publishing, 2015, p. 307-316. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-17777-9_33. Acesso em: 1 set. 2024.

MARTINEZ DE ALEGRIA, Inigo; MARTÍN MARTÍN, José Luis; KORTABARRIA, Inigo; ANDREU, Jon; IBAÑEZ EREÑO, Pedro. Transmission alternatives for offshore electrical power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. Disponível em: <link>.

MING, L.; GUANG, N.; LIN, W.; ZHANG, A.; WEI, L. Decentralized coordinated control of hybrid wind-thermal power system. *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, p. 7040-7047, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CHICC.2014.6896162>.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). Wind Energy Basics. Disponível em: <https://www.nrel.gov/wind/>. Acesso em: 12 out. 2024.

PAULA, C. et al. Wind Resource Assessment in Building Environment: Benchmarking of Numerical Approaches and Validation with Wind Tunnel Data. *Wind*, v. 2, n. 4, p. 659–690, 2022.

PRINCE, Trevor. James Blyth — Britain's First Modern Wind Power Pioneer. *Wind Engineering*, v. 29, p. 191-200, 2005. Disponível em: <10.1260/030952405774354921>.

PROJECT DRAWDOWN. Micro Wind Turbines. 2020. Disponível em: <https://www.drawdown.org/solutions/micro-wind-turbines>. Acesso em: 20 abr. 2024.

SANSWATT, T.; OCHOA, L.; HARRISON, G. Integrating distributed generation using decentralised voltage regulation. *IEEE PES General Meeting*, p. 1-6, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5588127>.

SILVA, J. F. Previsão de geração de energia em sistemas de microgeração eólica. *Journal of Renewable Energy*, v. 10, n. 2, p. 121–140, 2022.

SOUZA, M. A. Avaliação do potencial eólico para microgeração em ambientes suburbanos e rurais. *Revista de Energias Renováveis*, v. 8, n. 3, p. 215–230, 2023.

TELLES, A. Automação e Controle Eletrônico de Airborne Wind Turbines: Implementação no Projeto Zephyrus, 2024.

TURN2ENGINEERING. The Future of Energy: Distributed Generation Systems. Disponível em: <https://www.turn2engineering.com>. Acesso em: 24 out. 2024.

VAN DER VLUGT, Sander et al. Design and Experimental Characterization of a Pumping Kite Power System. *Renewable Energy*, v. 131, p. 833-844, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119304616>. Acesso em: 1 set. 2024.

VIEIRA, Bruna et al. Revisão do estado da arte em desenvolvimento de mapa do potencial eólico de regiões urbanas. 2020. Disponível em <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/957/957>

WILDMANN, N. et al. MASC – a small Remotely Piloted Aircraft (RPA) for wind energy research. *Atmospheric Science Research*, 2014. Disponível em: <link>.

WILLIAMS, Paul et al. Challenges and Opportunities of Airborne Wind Energy Systems for Offshore Applications. *Renewable Energy*, v. 159, p. 789-798, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120300939>. Acesso em: 1 set. 2024.

ZALENGERA, C.; TO, L.S.; SIEFF, R. et al. Decentralization: the key to accelerating access to distributed energy services in sub-Saharan Africa?. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, v. 10, p. 270-289, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13412-020-00608-7>.

ZEPPELIN NT. Disponível em: <https://www.airships.net/zeppelin-nt/>.

