

GERADOR EÓLICO A PARTIR DO FLUXO DE AR LAMINAR

Igor Alves de Carvalho¹, João Bandeira de Melo Netto¹, Gabriel Gomes de Carvalho Pereira², João Vitor Leite Penariol³, Reginaldo Berchior de Oliveira Junior³, André Luis Bonaventura³.

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica/Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias - 12228-904 - São José dos Campos - SP, bandeira@ita.br, igoriac@ita.br.

²Universidade de São Paulo - Escola Politécnica /Departamento de Energia e Automação Elétrica - Avenida Prof. Luciano Gualberto, Travessa do Politécnico, 380, Cidade Universitária - 05508-010 - São Paulo-SP, Brasil, gomescarvalho@usp.br.

³Dirac Energia Ltda – startup incubada no UPLab-SENAI no Parque de Inovação Tecnológico de São José dos Campos-SP, Estrada Dr. Altino Bondensan, 500 - 12247-016 - Eugênio de Melo, São José dos Campos - SP, joaopenariol@diracenergia.com, reginaldo@diracenergia.com, andre@diracenergia.com.

Resumo

A geração de energia limpa e sustentável é crucial, especialmente no setor aeronáutico, responsável por 2% das emissões globais de dióxido de carbono. Diversas pesquisas buscam descarbonizar o setor, explorando alternativas como combustíveis de aviação sustentáveis (SAF), hidrogênio e propulsão elétrica e híbrida. Este estudo investiga o potencial de um gerador eólico acionado pelo fluxo de ar laminar que escoar em um perfil aeronáutico. A metodologia combinou simulações computacionais e experimentos práticos, resultando em um protótipo com nível de maturidade tecnológica TRL-4. Os testes confirmaram que o fluxo de ar laminar foi eficaz para girar um conjunto de hélices conectada a um gerador elétrico, convertendo energia mecânica em elétrica. O diferencial da inovação, em relação aos concorrentes, é que o gerador eólico fica localizado no interior da aeronave e o fluxo de ar utilizado é o fluxo de ar laminar capturado por um perfil aeronáutico do tipo NACA duct acoplado a fuselagem da aeronave. O trabalho sugere melhorias no gerador para aumentar a potência gerada. Conclui-se que o uso de aerogeradores internos em aeronaves pode reduzir colaborar para descarbonização.

Palavras-chave: Descarbonização. Energia Eólica. Fluxo de Ar Laminar. Aerodinâmica.

Área do Conhecimento: Engenharia Aeroespacial

Introdução

Uma aeronave utiliza motores para a propulsão, essencial tanto para superar a resistência do ar quanto para gerar o fluxo aerodinâmico necessário à sustentação das asas. Tradicionalmente, esses motores são alimentados por combustíveis líquidos, como etanol em aeronaves de pequeno porte e, mais comumente, querosene de aviação em aeronaves comerciais e de maior escala. A escolha do combustível é fundamental para o desempenho e a eficiência das aeronaves, influenciando diretamente o alcance, a velocidade e o impacto ambiental da operação (Rodrigues, 2013).

Todavia, a queima de combustíveis, especialmente os de origem fóssil, como o querosene de aviação, emite gases causadores do efeito estufa, em particular: dióxido de carbono (CO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Por esse motivo, o setor aeronáutico global é responsável por 2% de toda a emissão de CO₂ na atmosfera, tornando-se necessário desenvolver tecnologias que promovam a descarbonização, ou seja, que emitam menos gases nocivos ao meio ambiente (Jones, 2024).

Para reduzir o impacto do setor aeronáutico nas mudanças climáticas, a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) emitiu uma resolução que estabelece que, a partir de 2027, as aeronaves que operam no Brasil devem utilizar no mínimo 1% de SAF (Combustível Sustentável de Aviação). Até 2037, essa exigência aumentará para 10% (Costa, 2024). No contexto internacional, os esforços são ainda mais ambiciosos, com a previsão de que o setor aeronáutico atinja zero emissões líquidas de CO₂ até 2050.

Além das pesquisas em combustíveis sustentáveis, também estão em andamento estudos sobre aeronaves elétricas e híbridas. No caso das aeronaves elétricas, a propulsão seria exclusivamente elétrica, eliminando completamente o uso de combustíveis fósseis. Já as soluções híbridas combinam a propulsão elétrica com o uso de combustíveis convencionais ou hidrogênio oriundo da biomassa ou eletrólise da água, proporcionando uma transição mais gradual para a descarbonização do setor aeronáutico.

No contexto da eletrificação, seja para sistemas exclusivamente elétricos ou híbridos, diversas soluções estão em fase de validação. Entre elas, destaca-se a fixação de painéis fotovoltaicos nas asas e na estrutura da aeronave, o uso de células a combustível de hidrogênio, que convertem o gás hidrogênio em corrente elétrica, e até mesmo sistemas eólicos, tal como desenvolvido aqui nessa pesquisa.

No que tange ao uso de geradores eólicos em aeronaves, já existem as turbinas RAT (Ram Air Turbine). No entanto, essas turbinas são acionadas principalmente em situações de emergência. Nessas condições, a energia eólica é convertida em energia elétrica. Como a RAT gera força de arrasto, é comum que essas turbinas fiquem recolhidas dentro da aeronave, similar ao trem de pouso durante o voo de cruzeiro. Quando necessário, um compartimento se abre, a RAT é liberada e exposta ao fluxo de ar. O uso dessa tecnologia requer grande experiência do piloto, pois, além de gerar força de arrasto, pode causar instabilidade na aeronave.

Metodologia

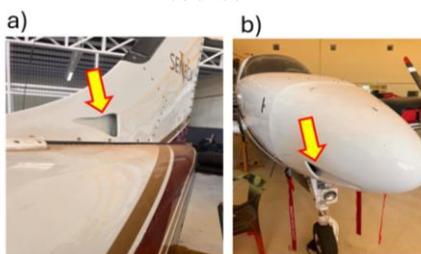
A potência elétrica gerada por uma turbina eólica, seja em voo ou em solo (no caso de geradores eólicos em fazendas eólicas), é diretamente proporcional à densidade do ar (ρ , em kg/m^3), à área varrida pelas pás do rotor (A , em m^2), à velocidade do vento (v , em m/s) e ao coeficiente de potência do aerogerador (C_p). Essa relação pode ser expressa pela Equação 1.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (1)$$

Da equação acima, a velocidade é uma grandeza física relevante, pois está elevada ao cubo. A velocidade de cruzeiro de aviões comerciais e de LSA (Light Sport Aircraft) varia bastante dependendo do tipo específico de aeronave. Por exemplo, em aviões de linha comercial (como o Boeing 737 ou o Airbus A320), a velocidade de cruzeiro típica varia entre 780 e 850 km/h . Já em aviões LSA, como o Cessna 162 Skycatcher ou o Pipistrel Virus SW, a velocidade de cruzeiro geralmente fica entre 160 e 300 km/h .

Uma forma de capturar o ar e reduzir significativamente a força de arrasto é por meio de uma ranhura na superfície aerodinâmica da aeronave denominada "NACA duct". O NACA duct é projetado cuidadosamente com base em princípios físicos e aerodinâmicos. Optar por uma geometria em que a entrada de ar é menor que a saída pode aumentar a velocidade do ar, de acordo com o princípio de Bernoulli. A Figura 1, feita pelos autores em uma visita ao aeroclube em Bragança Paulista - SP, mostra dois perfis NACA duct em aviões distintos - representadas pelas setas amarelas.

Figura 1 – Exemplo real de um perfil NACA duct em aviões: a) estabilizador vertical; b) parte frontal do avião



Fonte: autores (2024)

Comentado [HK1]: A metodologia poderia iniciar neste parágrafo

Outro conceito físico e aerodinâmico que pode ser explorado para otimizar aplicações da NACA duct é o princípio de continuidade e o tubo de Venturi (Tipler; Mosca, 2006). Por meio de uma análise minuciosa, pode-se determinar a geometria do NACA duct a fim de aumentar ou diminuir a velocidade do ar, conforme a Equação 2 (equação de continuidade de fluido). Onde A_1 e A_2 são áreas das seções transversais do ducto, ora de entrada (A_1) e ora de saída (A_2), e V_1 e V_2 são as velocidades do ar nas respectivas seções.

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2)$$

Todavia, a performance aerodinâmica de uma aeronave é fundamental para seu desempenho e consumo de combustível. Por isso, é comum realizar estudos analíticos e computacionais, por meio de simulações CFD (Computational Fluid Dynamics), para determinar a melhor performance. Além disso, o fluxo de ar em torno da aeronave pode assumir regimes diferentes. Por exemplo, próximo à superfície (a alguns milímetros, em torno de 3 mm), há um fluxo laminar. Acima desse fluxo laminar, pode haver o fluxo de transição e o fluxo turbulento. O fluxo turbulento pode ser homogêneo ou até mesmo caótico, dependendo do perfil aerodinâmico.

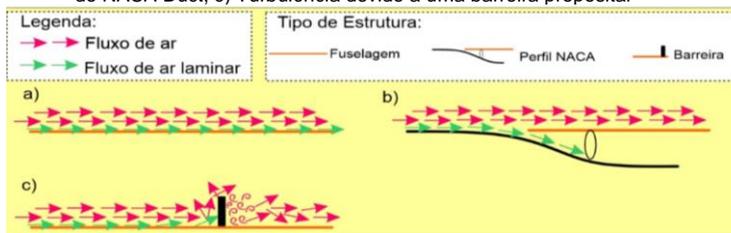
Neste trabalho, investigaremos os benefícios de utilizar o fluxo de ar laminar para acionar um conjunto de hélices localizado no interior da NACA duct, transformando assim a energia eólica em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica. A ideia fundamental é gerar energia elétrica durante o voo para carregar baterias, reduzindo a quantidade de combustível necessário para converter a energia química em energia mecânica e, finalmente, em energia elétrica. Portanto, este projeto visa diminuir o consumo de combustível fóssil e, assim, contribuir para a descarbonização do setor aeroespacial e aeronáutico.

Sendo assim, de forma geral, a metodologia combinou simulações computacionais e experimentos práticos (com base na metodologia TRL: Technology Readiness Level), resultando em um protótipo com nível de maturidade tecnológica TRL-4. Inicialmente, foi realizado um estudo do Estado da Arte sobre o tema. Em seguida, foram estudados modelos de NACA duct e o foram feitos desenhos em CAD, utilizando a versão para estudantes e gratuita do software. Posteriormente, imprimiu-se a melhor NACA duct e construiu-se um protótipo, no qual foram instalados uma hélice, um gerador eólico e um multímetro. Para gerar o fluxo de ar laminar, foi utilizado um motor de aspirador de pó, cujo fluxo de ar foi direcionado tangencialmente à face da entrada da NACA duct e intensidade do vento foi mensurada com anemômetro digital.

Resultados

Após revisão literária sobre o Estado da Arte em fluxo de ar sobre superfícies aerodinâmicas, simulamos o fluxo de ar em diferentes cenários, conforme demonstrado na Figura 2. Nessa figura, são apresentados o fluxo de ar e também o fluxo de transição/convenção (em rosa) e o fluxo de ar laminar (em verde) aderido à superfície (fuselagem, representada pela linha laranja). Na Figura 2-A, é ilustrada uma superfície lisa e sem obstáculos. Note que o fluxo é homogêneo e laminar. Na Figura 2-B, é ilustrado um perfil do tipo NACA duct, representado por uma curva descendente. Nesse caso, observa-se que o fluxo de ar laminar, que está "colado" à superfície, desce pela rampa, enquanto o fluxo de transição percorre a fuselagem. Finalmente, na Figura 2-C, foi posicionada uma barreira. Note que, ao encontrar a barreira, o fluxo de ar encontra resistência, e após passar pela barreira, o fluxo torna-se turbulento.

Figura 2 - a) Fluxo de ar tangente à superfície plana; b) Fluxo de ar laminar seguindo a superfície do NACA Duct; c) Turbulência devido a uma barreira proposital



Fonte: autores (2024).

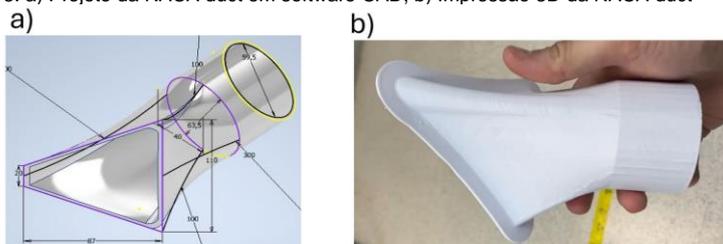
Comentado [HK2]: Arrumar a fonte que está diferente e maior

Comentado [HK3]: Verificar espaçamento após equação

Comentado [HK4]: Arrumar a fonte que está maior

O próximo passo foi pesquisar os diferentes tipos de perfil NACA duct. Em seguida, utilizando um software CAD, foi elaborado o desenho conforme a figura 3-a. Neste projeto, foram considerados conceitos de física e aerodinâmica, além da caracterização de voo de um avião da classe LSA. Note que a entrada de ar corresponde à região triangular, e a saída de ar à região circular. A conexão entre ambas as regiões (entrada e saída) foi planejada de modo a não perturbar o fluxo de ar laminar. Após a conclusão do desenho da NACA duct, a mesma foi impressa em uma impressora 3D, conforme a figura 3-b.

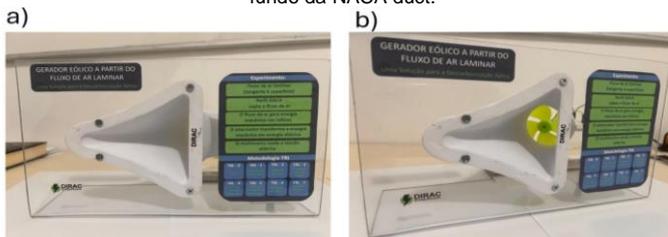
Figura 3: a) Projeto da NACA duct em software CAD; b) Impressão 3D da NACA duct



Fonte: autores (2024).

Para validar a inovação, ou seja, utilizar o fluxo de ar laminar para produzir energia eólica, foi construído um protótipo, conforme a Figura 4. Na figura 4-a, é apresentado o protótipo de frente. Na figura 4-b, mostra-se o protótipo na diagonal, com foco no conjunto de hélices localizada no fundo da NACA duct.

Figura 4: a) Protótipo visto de frente; b) Protótipo visto na diagonal, com foco no conjunto de hélice no fundo da NACA duct.



Fonte: autores (2024).

Por fim, para testar o protótipo em bancada (metodologia TRL-4), utilizou-se como fonte de ar um motor aspirador de pó. O fluxo de ar foi posicionado a fim de que o ar fosse tangente à entrada da NACA duct. Com um anemômetro digital, mediu-se a velocidade do vento, que atingiu 158 km/h. Verificou-se que parte do fluxo de ar, o fluxo laminar, foi capturado pela NACA duct e fez mover as hélices. Esse movimento gerou energia elétrica, registrando um pico de tensão de 11 V no multímetro conectado ao gerador eólico. Os próximos passos envolvem superar o nível TRL-5; para isso, será utilizado um motor mais robusto e implementadas melhorias no experimento e na NACA duct.

Discussão

Com base na revisão da literatura, nos experimentos de bancada e na necessidade urgente de descarbonização no setor aeronáutico, a solução apresentada mostra-se promissora. Um ponto relevante é que o gerador eólico ficará localizado no interior da aeronave, ou seja, no final da NACA duct. Essa solução, comparada com os geradores eólicos posicionados externamente à aeronave, como a turbina RAT, gera menos força de arrasto. Outro fator positivo para amadurecer essa tecnologia

até o nível TRL-9 e torná-la comercialmente viável é que a potência elétrica é proporcional ao cubo da velocidade. Por exemplo, para aviões comerciais, que possuem velocidade média entre 780 e 850 km/h, a solução aqui apresentada torna-se altamente relevante, pois permite que tais aviões evitem queimar combustível para gerar energia elétrica.

Conclusão

O setor aeronáutico já quantificou as emissões de gases causadores do efeito estufa que produz. Tanto por meio de agências reguladoras (como a ANAC) quanto pelo mercado internacional, foram estabelecidas metas claras para reduzir as emissões, com o objetivo de zerá-las até 2050. Todavia, alcançar essa meta requer PD&I, como o desenvolvimento de um gerador eólico que utiliza o fluxo de ar laminar. A sutil diferença em utilizar o fluxo de ar laminar, em vez do fluxo de ar convencional, é relevante, pois a posição do gerador no interior da aeronave minimiza a força de arrasto e a instabilidade aerodinâmica. Considerando que a potência elétrica é diretamente proporcional ao cubo da velocidade, e que a tecnologia em validação é simples, essa solução surge com grande potencial para impactar o setor aeronáutico e contribuir parcialmente para sua descarbonização.

Referências

Costa, E. Combustível do Futuro: Aviação Civil tem Preocupação com Preços do SAF. **Agência iNFRA**. Disponível em: <https://agenciainfra.com/blog/combustivel-do-futuro-aviacao-civil-tem-preocupacao-com-precos-do-saf/>. Acesso em: 15 jun. 2024.

Jones, F. Brasil se prepara para produzir combustível sustentável de aviação. **Revista FAPESP**. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/brasil-se-prepara-para-produzir-combustivel-sustentavel-de-aviacao/>. Acesso em: 25 maio. 2024.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da engenharia Aeronáutica**. 1 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

Tipler, P. A.; Mosca, G. **Física: Para Cientistas e Engenheiros**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

Agradecimentos

A startup Dirac Energia agrade à FAPESP pelo apoio à PD&I via projeto PIPE-FAPESP, ao UpLab-SENAI, Parque Tecnológico de São José dos Campos e CPqD-Campinas, ITA e USP.