

CONCEITO E BENEFÍCIOS DE ASAS TRANSFORMÁVEIS (*MORPHING*) EM AVIÕES

Neylor Franco Barbosa¹

Édson Cabral²

Francisco Conejero Perez³

RESUMO

As asas da aeronave são um compromisso que permite à aeronave voar em diversas condições de voo, mas o desempenho em cada condição é abaixo do ideal. A capacidade da superfície de uma asa de alterar sua geometria durante o voo tem interessado pesquisadores e projetistas ao longo dos anos, pois reduz os compromissos de projeto necessários. *Morphing* é a forma abreviada de metamorfose; entretanto, não existe uma definição exata nem um acordo entre os pesquisadores sobre o tipo ou a extensão das mudanças geométricas necessárias para qualificar uma aeronave para o título de 'metamorfose de forma'. Os parâmetros geométricos que podem ser afetados pelas soluções de *morphing* podem ser categorizados em: alteração da forma do plano (envergadura, varredura e corda), transformação fora do plano (torção, diedro e flexão no sentido da envergadura) e ajuste do aerofólio (curvatura e espessura). Alterar a forma ou geometria da asa não é novidade. Historicamente, as soluções de transformação sempre levaram a penalidades em termos de custo, complexidade ou peso, embora, em certas circunstâncias, estas tenham sido superadas por benefícios no nível do sistema. A tendência atual para aeronaves altamente eficientes e “verdes” torna tais compromissos menos aceitáveis, exigindo projetos de *morphing* inovadores capazes de proporcionar mais benefícios e menos desvantagens. Desenvolvimentos recentes em materiais “inteligentes” podem superar as limitações e aumentar os benefícios das soluções de design existentes. O desafio é projetar uma estrutura que seja capaz de suportar as cargas prescritas, mas que também seja capaz de alterar a sua forma: idealmente, não deveria haver distinção entre a estrutura e o sistema de atuação. A combinação de estruturas *morphing* e inteligentes numa abordagem integrada requer um pensamento multidisciplinar desde o desenvolvimento inicial, o que aumenta significativamente a complexidade geral, mesmo na fase preliminar do projeto. *Morphing* é uma tecnologia promissora

para as futuras aeronaves da próxima geração. No entanto, os fabricantes e os utilizadores finais ainda estão demasiado céticos quanto aos benefícios para adotarem a transformação num futuro próximo, mas é apenas uma questão de tempo até vermos asas de aeronaves que exibem capacidades de transformação que hoje parecem impossíveis.

Palavras-chave: Asas adaptáveis; Economia de combustível; Desempenho aerodinâmico

¹ Curso técnico em análises químicas pelo ITB - Instituto Técnico de Barueri/SP em 2012; Curso Superior Técnico de Polícia Ostensiva e Preservação da Ordem Pública pela PMESP em 2016 e graduando no Curso Superior de Tecnologia em Pilotagem Profissional de Aeronaves pela EAR – Escola Superior do Ar. E-mail: neylorfb09@hotmail.com

² Doutor em Geografia Física (Climatologia Urbana) (USP, 2002). Mestre em Geografia Física (Climatologia Urbana) (USP, 1997). Especialista em Administração de Empresas – Comércio Exterior (FECAP, 1993). Licenciado em Geografia (USP, 1991). Bacharel em Geografia (USP, 1986). Professor de Meteorologia Aeronáutica da Escola Superior do Ar e LATAM no curso de Ciências Aeronáuticas da Escola Superior do Ar. E-mail: edson.cabral@escolasuperiordoar.com.br

³ Coordenador do Curso Superior de Tecnologia em Pilotagem Profissional de Aeronaves pela EAR – Escola Superior do Ar, Guarulhos, Brasil, Professor Faculdade de Tecnologia AeroTD, formado em pedagogia pela Universidade Ibirapuera em 2002, Mestre em Educação pela Universidade Mackenzie em São Paulo, 2004, Doutor em Administração na UDE –Montevideo em 2017, realizou curso de Política e Estratégia na Associação de Diplomados na Escola Superior de Guerra em 2005, São Paulo Brasil, realizou MBA –FGV -Administração de Empresas de Transporte Aéreo em 2010, curso de especialização em Finanças Internacionais, Macroeconomia e Competências gerenciais pela FGV em 2008, MBA pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica ITA, na área de engenharia em aeronáutica e Técnico em aviões pela Escola de Especialistas de Aeronáutica - 1970, Piloto Internacional de Linha Aérea da LATAM. Piloto militar da Força Aérea Brasileira entre 1971 e 1977. E-mail: francisco.c.perez@live.com

ISSN 2763-7697

CONCEPT AND BENEFITS OF MORPHING WINGS IN AIRPLANES

ABSTRACT

Aircraft wings are a compromise that allows the aircraft to fly at a range of flight conditions, but the performance at each condition is sub-optimal. The ability of a wing surface to change its geometry during flight has interested researchers and designers over the years as this reduces the design compromises required. Morphing is the short form for metamorphose; however, there is neither an exact definition nor an agreement between the researchers about the type or the extent of the geometrical changes necessary to qualify an aircraft for the title 'shape morphing.' Geometrical parameters that can be affected by morphing solutions can be categorized into: planform alteration (span, sweep, and chord), out-of-plane transformation (twist, dihedral/gull, and span-wise bending), and airfoil adjustment

(camber and thickness). Changing the wing shape or geometry is not new. Historically, morphing solutions always led to penalties in terms of cost, complexity, or weight, although in certain circumstances, these were overcome by system-level benefits. The current trend for highly efficient and 'green' aircraft makes such compromises less acceptable, calling for innovative morphing designs able to provide more benefits and fewer drawbacks. Recent developments in 'smart' materials may overcome the limitations and enhance the benefits from existing design solutions. The challenge is to design a structure that is capable of withstanding the prescribed loads but is also able to change its shape: ideally, there should be no distinction between the structure and the actuation system. The blending of morphing and smart structures in an integrated approach requires multi-disciplinary thinking from the early development, which significantly increases the overall complexity, even at the preliminary design stage. Morphing is a promising enabling technology for the future, next-generation aircraft. However, manufacturers and end users are still too skeptical of the benefits to adopt morphing in the near future, but it is just a question of time before we see aircraft wings that exhibit morphing capabilities that seem impossible today.

Keywords: Morphing wings; fuel efficiency. aerodynamic performance.

1 INTRODUÇÃO

A aviação contemporânea é um campo de constante inovação, impulsionado pela busca incessante por aeronaves mais eficientes, seguras e versáteis. Nesse contexto, a tecnologia de asas adaptáveis, também conhecida como *morphing*, emerge como uma promessa revolucionária para o setor. Ao permitir que a forma das asas se adapte dinamicamente durante as fases do voo, essa tecnologia promete não apenas melhorar o desempenho aerodinâmico das aeronaves, mas também ampliar significativamente sua capacidade operacional e eficiência energética.

Este artigo se propõe a explorar em profundidade o conceito e o potencial da tecnologia de asas adaptáveis, com foco em seu impacto no desempenho geral das aeronaves. Por meio de uma análise detalhada dos princípios de funcionamento, benefícios e aplicações práticas, buscou-se oferecer uma compreensão abrangente dessa tecnologia e seu papel na evolução da aviação moderna.

Inicialmente, serão apresentados os objetivos deste trabalho, delineando as metas específicas que orientarão a investigação. Em seguida, será apresentada a fundamentação teórica, revisitando desde os primórdios do conceito de asas adaptáveis até os mais recentes avanços e descobertas científicas na área. A partir dessa base teórica sólida, será avaliada de forma crítica o potencial impacto da tecnologia de asas adaptáveis no cenário aeronáutico atual e futuro.

Ao se compreender melhor os fundamentos e as aplicações práticas dessa tecnologia, é possível explorar suas implicações em termos de eficiência energética, desempenho operacional e sustentabilidade ambiental. Por meio de uma abordagem interdisciplinar, este artigo busca contribuir para o avanço do conhecimento científico e tecnológico no campo da aviação, oferecendo *insights* valiosos para pesquisadores, engenheiros e profissionais do setor.

Por fim, ao abordar os desafios e oportunidades associados à implementação da tecnologia de asas adaptáveis, espera-se estimular o debate e inspirar futuras inovações que possam transformar radicalmente a maneira como se concebe e operam algumas aeronaves do século XX e futuras.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Demonstrar o conceito da tecnologia de asas adaptáveis *morphing* e o seu potencial de melhoria de desempenho geral em aeronaves de asa fixa de transporte comercial.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os primeiros projetos de aeronaves com o conceito de *morphing*;
- Descrever, de forma sintética, como a tecnologia de asas transformáveis funciona;
- Analisar os principais benefícios de uma asa *morphing*;
- Demonstrar a economia de combustível resultante do *morphing* das asas.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, são descritos os métodos utilizados para abordar tanto a pesquisa teórica quanto a implementação prática das asas transformáveis. Para a pesquisa teórica, seguiram-se as seguintes etapas: No levantamento bibliográfico, inicialmente, foi realizada uma revisão abrangente da literatura acadêmica relacionada ao conceito de asas transformáveis. Isso incluiu uma busca por artigos científicos, livros, teses e dissertações relevantes desde os estudos pioneiros até pesquisas contemporâneas.

Na análise crítica, procedeu-se com uma análise dos materiais reunidos. Foram avaliadas as teorias, modelos e resultados encontrados na literatura, destacando abordagens comprovadas, lacunas no conhecimento e áreas de debate e por fim, na síntese de conhecimento, foram organizadas e sintetizadas as informações coletadas. Identificou-se conceitos-chave, tendências e desafios associados às asas transformáveis, com o objetivo de estabelecer uma base sólida para o desenvolvimento subsequente.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a estrutura teórica do trabalho, baseado em pesquisas acadêmicas sobre o conceito de asas transformáveis *morphing*. Na década de 1920 foram apresentados conceitos que usavam dispositivos para aumentar a sustentação durante operações de decolagem ou pouso, mesmo ano em que se registrou a primeira patente de um conceito de asa com curvatura de perfil variável *morphing* (Parker, 1920).

Aviões convencionais de asas fixas são projetados conforme as suas finalidades, seus perfis de asa e formatos são otimizados para apenas um segmento de seus perfis de missão ou envelopes de voo, ou seja, cruzeiro para aviões de transporte e manobras para caças, por exemplo. Para todos os outros segmentos, os aviões de asa fixa apresentam desempenho comprometido. Por outro lado, a capacidade de transformação de asa promete formatos otimizados para todas as fases de uma missão. Portanto, com a capacidade de reconfiguração

aerodinâmica da asa, o desempenho da missão dos aviões pode ser aumentado e/ou as missões que requerem vários tipos de aeronaves podem ser realizadas com menos tipos.

A tecnologia também tem o potencial de simplificar e até eliminar totalmente sistemas de controle convencionais mecanicamente complexos e pesados, reduzindo o arrasto aerodinâmico e o ruído (Özgen *et al.*, 2010). Em resumo, uma asa *morphing* foi projetada para ser 'adaptativa', o que significa ser capaz de mudar de forma automaticamente durante o voo, sem fendas ou degraus nas superfícies da asa, para minimizar os possíveis impactos no arrasto aerodinâmico, usando um sistema de controle sem qualquer intervenção direta do piloto.

Em testes realizados em túnel de vento, foi verificado que os melhores desempenhos foram nas condições de maiores reconfigurações geométricas, como no caso da ativação de todas as seções da asa simultaneamente (Emeliava, 2016). Ao longo dos anos, numerosos projetos e trabalhos de pesquisa foram conduzidos em relação aos conceitos de aerofólio com curvatura para aeronaves comerciais, entre eles o conceito de bordo de fuga com linha de curvatura média variável (VCCTEF) para aplicação em aeronaves comerciais, que vem sendo desenvolvido pela NASA há alguns anos (Nguyen *et al.*, 2015). A conclusão demonstrou redução significativa do arrasto por intermédio da aplicação do conceito aerofólio *morphing* e grande potencial para economia de combustível e energia pela mudança adaptativa do aerofólio durante o voo (Marciniuk *et al.*, 2024).

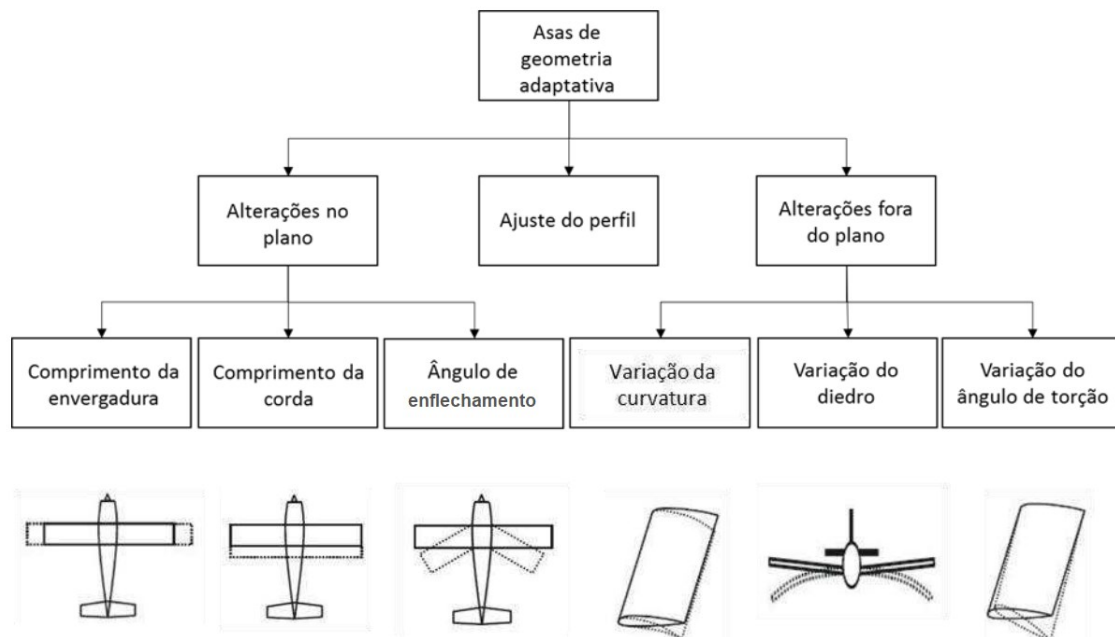
5 CONCEITO E CLASSIFICAÇÃO DE AERONAVES MORPHING

O termo 'aeronave *morphing*' descreve uma ampla gama de veículos aéreos e componentes de veículos que se adaptam aos requisitos de missões multiponto planejadas e não planejadas. A adaptação ou transformação requer a alteração dos recursos do sistema, incluindo as condições do veículo, como o formato do veículo, durante a operação em voo. O termo *morphing* pode ser aplicado a quase todas as atividades nas quais as características do veículo em voo são alteradas. Do mesmo modo, *morphing* tornou-se uma palavra da moda aplicada vagamente a

uma ampla variedade de atividades, algumas das quais estão desconectadas do desenvolvimento de *morphing* de veículos aéreos. Isso levou a três mitos: 1) o manutenção da tecnologia possui valores elevados, 2) as aeronaves com tecnologia *morphing* devem pesar mais do que as aeronaves convencionais e 3) a transformação requer materiais com valor elevado e sistemas complexos (Weisshaar, 2013).

Tuba *et al.* (2021) classificaram a transformação da asa em três grandes categorias: transformação no plano, transformação fora do plano e ajuste de perfil, conforme mostra a Figura 1, a seguir.

Figura 1 - Classificação das adaptações de acordo com a reconfiguração geométrica das asas



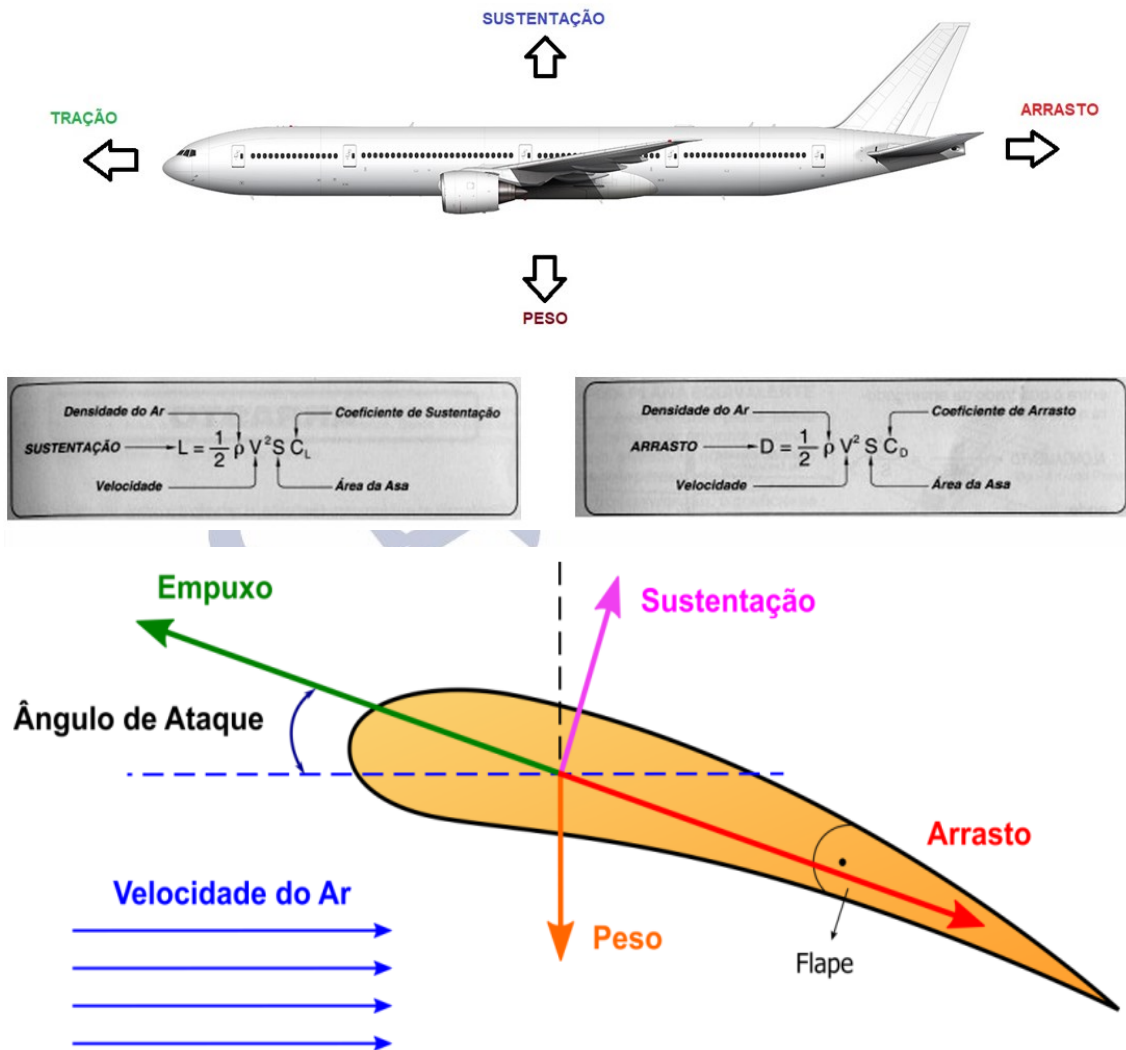
Fonte: Adaptado de Emiliavaca, 2016, p. 22.

Devido à complexidade dos efeitos aerodinâmicos, a forma ótima da carenagem da aeronave depende das condições de voo que são regidas a partir das equações de Navier-Stokes. Desta forma, o escoamento do ar ao redor da asa do avião é governado por equações não lineares e não têm solução analítica.

As investigações ao redor dos componentes dos aviões são estudadas caso a caso de modo a representar, com uma melhor aproximação, as situações reais. Diversas hipóteses são consideradas com o objetivo de descrever o movimento da

aeronave e, assim, as teorias são desenvolvidas para partes específicas. Com o entendimento dos efeitos aerodinâmicos, as pesquisas podem seguir para a otimização da geometria nas condições de voo (Figura 2).

Figura 2 - Forças aerodinâmicas em um aerofólio



Fonte: Silva, 2018, p. 16.

A Figura 2 mostra, esquematicamente, as direções das forças atuantes na asa do avião: tração, sustentação, arrasto e peso. A sustentação é a força que mantém o avião em altitude de voo, gerado por todas as partes do avião, mas principalmente pela asa e é decorrente do movimento do avião em relação ao ar. O empuxo é a força que move a aeronave pelo ar, sendo gerado pelos motores em seu sistema de propulsão, superando o arrasto devido ao seu corpo e o próprio

peso. O arrasto é a resultante das forças que se opõem ao movimento da aeronave devido à resistência do ar.

O conceito de *morphing* leva em consideração as condições de voo. Ele depende da forma, tamanho e inclinação da aeronave e das condições de escoamento do ar que circula pelo avião. Em baixas velocidades, a forma do *flap* tem que permitir que a aeronave voe com melhor controle durante a decolagem – devido ao aumento da sustentação e diminuição do arrasto – e que reduza a velocidade de aproximação para pouso em um ajuste de sua geometria, de forma a aumentar o arrasto (Kumar, 2002).

Existem diferentes formas de arrasto que dependem do atrito (arrasto de cisalhamento) ou do gradiente da pressão (arrasto de pressão) entre a parte frontal e a posterior do perfil da aeronave. Desses dois casos, os mais importantes nesse estudo são o arrasto induzido e o arrasto parasita.

4.1 MORPHING FORA DO PLANO

O *morphing* fora do plano abrange mudanças na variação de curvatura, de diedro e de ângulo de torção no sentido da extensão da asa. Isto não inclui deformações locais no formato do aerofólio.

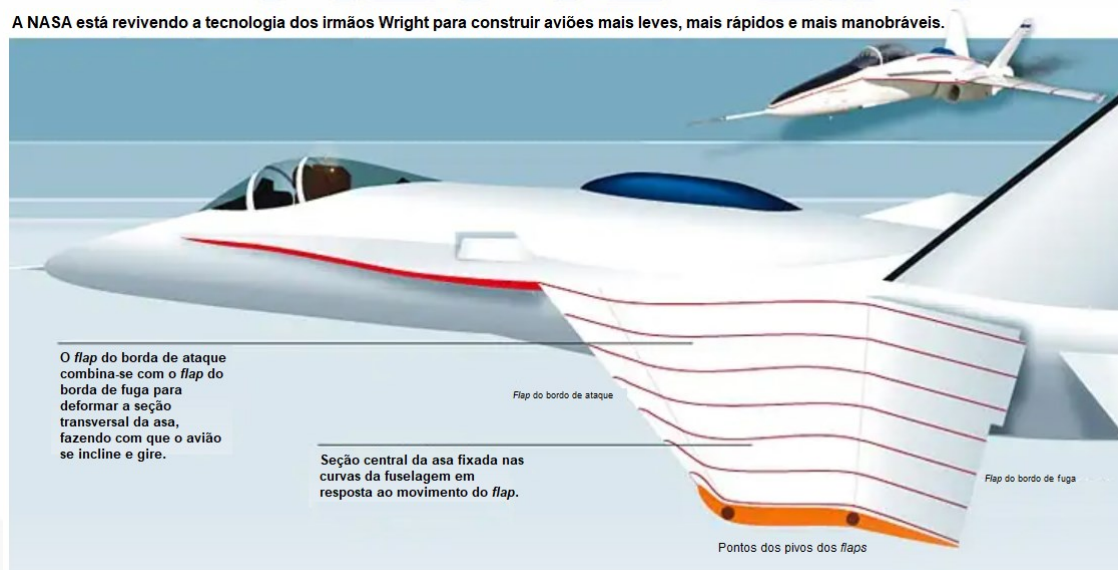
A torção da asa foi usada na primeira aeronave motorizada de sucesso, o Wright Flyer, que foi usada para controle de rotação. No entanto, esta forma de controle foi rapidamente substituída pelo *aileron*, que continua sendo o sistema preferido até hoje. Embora a transformação por torção retenha uma forma mais suave e livre de folgas, que incorre em menos arrasto do que uma superfície de controle articulada, geralmente requer um sistema de atuação mais complexo que utiliza mais energia. Além disso, torcer a asa sem utilizar energia excessiva exige que a asa seja mais flexível, o que poderia levar a fenômenos aeroelásticos indesejáveis dentro do envelope de voo.

No entanto, uma melhor compreensão da aeroelasticidade e o desenvolvimento de materiais compósitos tornaram a transformação por torção mais viável. *Morphing* de torção pode ter múltiplas funções: pode aumentar o coeficiente de sustentação, controlar a aeronave e aliviar cargas aerodinâmicas.

Essas funções também podem ser alcançadas com superfícies de bordo de fuga convencionais ou transformação de curvatura de aerofólio.

O programa de pesquisa de asas flexíveis ativas (*Active Aeroelastic Wing - AAW*) desenvolveu um sistema de *morphing* que fazia mudanças relativamente pequenas na forma dos bordos de ataque e de fuga para alavancar a flexibilidade da asa na torção e obter maior controle. Este estudo concluiu que a abordagem proposta poderia permitir que uma aeronave mantivesse controle de rotação além da velocidade de reversão do *aileron* de uma asa convencional equivalente. Isto foi posteriormente demonstrado no programa de asas aeroelásticas ativas, que incluiu voos de teste para um caça F/A-18 com superfícies *morphing* nas bordas de ataque e de fuga, conforme figura 3. Embora tais sistemas não tenham sido utilizados em aeronaves de transporte comercial, a tendência atual tem sido projetar envergaduras mais longas e asas mais flexíveis, onde a reversão do *aileron* se torna mais crítica e tais sistemas de *morphing* podem ser uma boa solução (Pendleton, 2000).

Figura 3 – Esboço do projeto AAW testado em um caça F/A-18



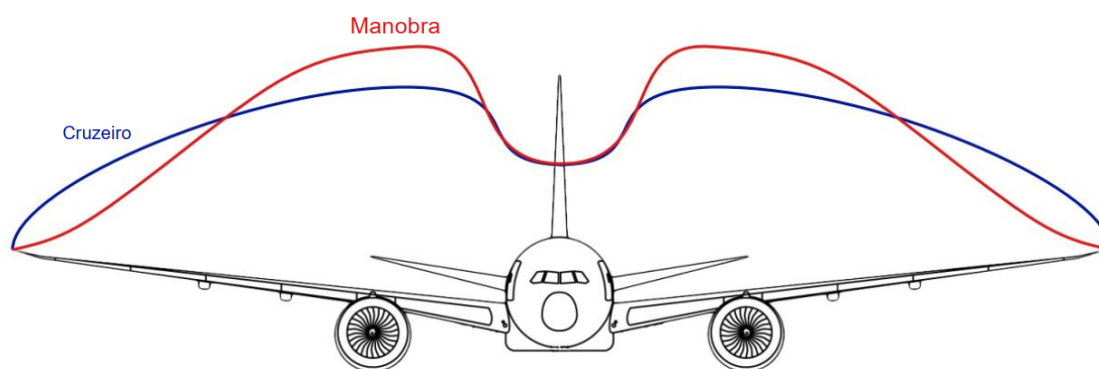
Fonte: NewScientist, 2002.

Além de permitir uma estrutura de asa mais leve (ou envergaduras maiores para peso semelhante), mantendo a eficiência de controle de uma asa mais

flexível, as deformações de torção também podem ser usadas para alívio de carga, o que diminui o peso estrutural da asa.

O alívio da carga da manobra depende menos do tempo e normalmente a sustentação total deve ser aumentada. Neste caso, as superfícies de controle atuam para redistribuir a carga para ficar mais concentrada em direção ao interior da asa para diminuir o momento fletor médio para a mesma sustentação total, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - A transformação por torção pode mudar a distribuição de sustentação interna sob condições críticas de carga para reduzir o peso estrutural da asa



Revista Brasileira de Aviação Civil
& Ciências Aeronáuticas

Fonte: Martins, 2016, p. 4.

Existem dois tipos principais de alívio de carga: alívio de carga de rajada e alívio de carga de manobra. O alívio da carga de rajada é realizado de forma dinâmica; assim que uma grande aceleração é detectada na asa, as superfícies de controle atuam para diminuir seu efeito nas cargas estruturais.

4.2 MORPHING NO PLANO

Morphing no formato do plano de uma asa inclui variar a varredura, envergadura ou comprimento de corda, os dois últimos afetam diretamente a área do plano. Historicamente, nunca foi demonstrado que a transformação da forma do plano funciona no transporte comercial, exceto para a extensão da corda fornecida por sistemas de alta sustentação.

A varredura é desejável para diminuir o arrasto das ondas, mas também diminui o coeficiente de sustentação geral, que precisa ser compensado com a área plana da linha de base, sistemas de alta sustentação ou ambos. Portanto, a varredura variável seria desejável porque torna possível reduzir o peso devido ao sistema de alta sustentação ou do tamanho da asa. Sistemas de varredura variável têm sido usados em diversas aeronaves militares supersônicas, mas nunca em transportes comerciais, que só precisam operar de forma otimizada dentro de uma faixa relativamente estreita de condições de cruzeiro.

O peso adicional dos sistemas de varredura variável e o reforço estrutural necessário nas fixações asa-fuselagem anulam as vantagens mencionadas acima. Além disso, o advento de sistemas sofisticados de alta sustentação e aerofólios supercríticos que permitem a redução da varredura também contribuem para a escolha de asas de varredura fixa.

Grandes envergaduras nos aerofólios são desejáveis para reduzir o arrasto induzido, que constitui cerca de 30% do arrasto total considerando uma aeronave típica de transporte comercial em voo de cruzeiro. Embora esta percentagem varie entre as diferentes fases do voo, não há incentivo para ter uma envergadura variável durante o voo.

A maior extensão possível determinada pelas compensações multidisciplinares é desejável em todas as condições de voo. Alguns projetos bem-sucedidos de aeronaves de envergadura variada foram desenvolvidos no passado, mas a motivação para eles foi a variação associada à área do plano para se adaptar a diferentes condições de voo. Um exemplo de projeto é o planador Akaflieg Stuttgart FS-29, que utiliza uma asa telescópica para se adaptar a duas velocidades diferentes: uma velocidade baixa ideal para subir em térmicas, ou uma velocidade alta para voar entre térmicas.

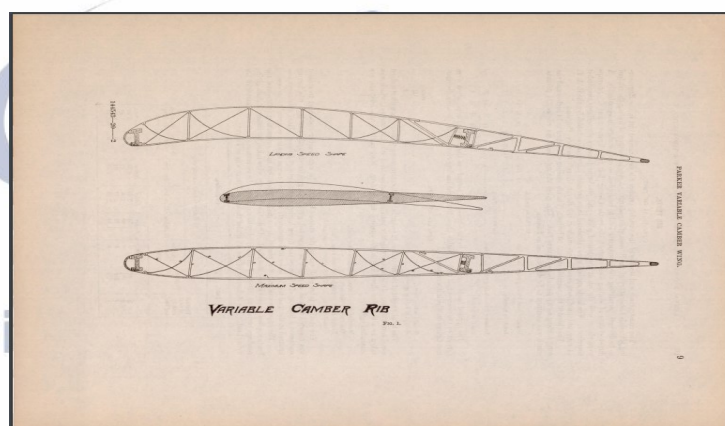
Embora não haja incentivos suficientes para variar a extensão da asa de um avião de transporte comercial em voo, há um grande incentivo para reduzir a extensão em terra devido a restrições nos portões. Quando o projeto do Boeing 777 foi lançado em 1994, foi fornecida uma opção de pontas de asas dobráveis, mas nenhuma companhia aérea selecionou este modelo. A ponta da asa dobrável foi ressuscitada no projeto Boeing 777X, que promete fornecer pontas dobráveis

que permitem um aumento de envergadura em relação ao Boeing 777 original, mantendo a compatibilidade com os portões que o Boeing 777 utiliza atualmente. O peso do mecanismo dobrável é considerado muito mais leve do que o mecanismo original.

6 PESQUISAS EM AERONAVES COM GEOMETRIA DE ASA ADAPTATIVA

Desde a aeronave apresentada pelos irmãos Wright que iniciativas de pesquisa em aeronaves adaptativas têm sido desencadeadas com a perspectiva de otimizar o voo através da reconfiguração geométrica, exemplificado na Figura 5 a seguir.

Figura 5 – Asa de curvatura variável desenvolvida por Parker, 1920



Fonte: Parker, 1920.

Adiante são apresentados alguns projetos desenvolvidos especificamente para implementação de tecnologias adaptativas.

5.1 PROJETOS MORPHING DE MECÂNICA CONVENCIONAL COM ALTERAÇÕES NO PLANO

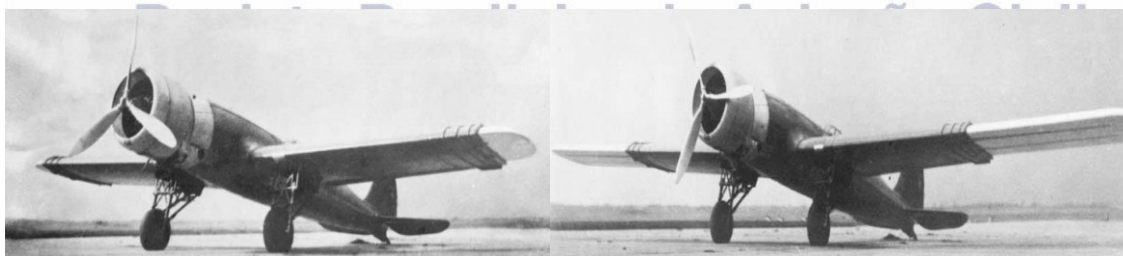
Uma aeronave *morphing* convencional muda sua configuração durante o voo, deformando-se mecanicamente, e foi introduzida principalmente por caças emergentes da corrida armamentista durante e após a Segunda Guerra Mundial. É o modelo de *morphing* mais comumente usados em aeronaves militares e civis. Esta seção apresenta aeronaves de *morphing* típicas, mas apenas alguns modelos

são incluídos porque discute principalmente as características de diferentes tipos e formas de *morphing* estrutural.

5.1.1 Asa com envergadura variável

A asa de envergadura variável é uma das asas que se transformam de forma mais simples. O projeto combinava as vantagens das asas de alta e baixa proporção, proporcionando à aeronave desempenho ideal multiponto e adaptabilidade multitarefa. No entanto, aumentar a envergadura faz com que o momento fletor da raiz da asa aumente e a distribuição de sustentação mude, resultando em testes rigorosos para a racionalidade do projeto e a qualidade de fabricação da asa. Portanto, inúmeras investigações sobre aeronaves com *morphing* de envergadura foram conduzidas para melhorar o desempenho de voo, a capacidade de rolamento e o controle de vibração. O MAK-10 (Figura 6), que foi projetado por Ivan Makhonine e voou pela primeira vez com sucesso em 1931, foi a primeira aeronave conhecida com *span morphing*.

Figura 6 – Makhonina Mak.10



Fonte: TOP WAR, 2016.

Suas asas telescópicas e atuadores pneumáticos ampliaram a envergadura em até 62% (de 13 para 21 metros). No entanto, as primeiras técnicas de *span morphing* não foram adotadas devido aos seus mecanismos volumosos e, nos últimos anos, o *span morphing* foi projetado principalmente para veículos aéreos não tripulados. Por exemplo, Tarabi *et al.* (2016) desenvolveram um modelo de asa com envergadura que consistia em um segmento de asa fixa e uma parte móvel dentro dele. Experimentos em túnel de vento mostraram que o modelo reduz o

arrasto e melhora a eficiência aerodinâmica, resultando em um aumento de 5% no alcance de voo e um aumento de 17% na resistência.

Inúmeros projetos semelhantes com revestimentos deslizantes rígidos foram propostos e testados, mas encontraram os mesmos problemas de degrau e descontinuidade nas transições das superfícies da asa. Para resolver esses problemas, Woods e Friswell (2015) exploraram a asa de proporção adaptativa, um conceito de asa integral que se transforma em envergadura com revestimento compatível feito de compósitos de matriz elastomérica (*elastomeric matrix composite* - EMC). A asa pode completar suavemente o processo de transformação da envergadura devido à superfície flexível que cobre o mecanismo da asa.

5.1.2 Asa com enflechamento variável

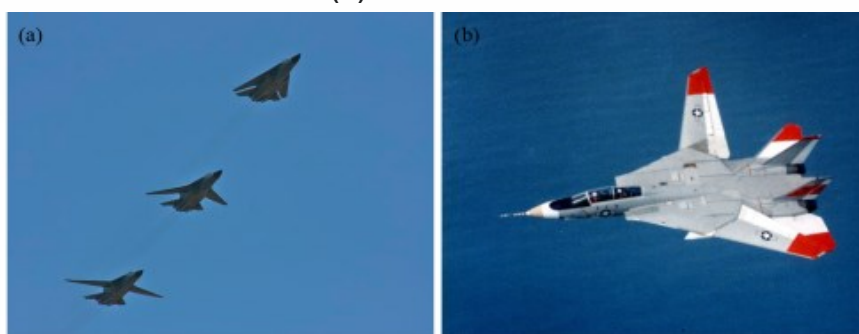
O ângulo de enflechamento de uma asa afeta consideravelmente seu desempenho de sustentação e eficiência aerodinâmica. Asas com enflechamento positivo possuem alta sustentação e baixo arrasto em altas velocidades, especialmente em velocidades supersônicas, devido à resistência às ondas de choque, e asas com pequenos ângulos de enflechamento positivo possuem alta sustentação em baixas velocidades. Muitos caças com asas de enflechamento variável (ou asas oscilantes) foram propostos durante e após a Segunda Guerra Mundial para combinar velocidades altas (para cruzeiros rápidos e manobras supersônicas) e baixas (para decolagens e pousos).

O Bell X-5, foi a primeira aeronave de asa variável, voou com sucesso em 1951. Seu mecanismo de transformação era acionado por um conjunto de parafuso e os freios a disco forneciam três posições de enflechamento: 20°, 40° e 60°. No entanto, devido ao seu *layout* aerodinâmico e falhas de mecanismo, ocorreram travamentos violentos e giros incontroláveis, resultando no cancelamento da pesquisa subsequente.

As duas aeronaves de enflechamento variável mais famosas do ocidente são o F-111 e o F-14. Como a primeira aeronave prática e de enflechamento variável produzida em massa do mundo, o F-111 pode enflechar de 16° a 72,5° e voar com

velocidade mach 2, como mostrado na figura 7 (a). Os pivôs das asas usados para recuar e transferir a carga para a fuselagem apresentam sérios problemas de fadiga e criam um arrasto de compensação significativo em velocidades hipersônicas. A partir do controle aerodinâmico, o ângulo de enflechamento da asa do F-14 pode variar de 20° a 68°, proporcionando uma razão de sustentação sobre o arrasto (L/D) ideal. Além disso, o F-14 pode mover suas asas assimetricamente para voar e pousar em emergências, como mostrado na Figura 7 (b).

Figura 7 - Processo de enflechamento *morphing* de aeronave: (a) sequência de enflechamento do F-111 e (b) enflechamento assimétrica do F-14



Fonte: Zhu *et al.*, 2023.

5.2 PROJETOS MORPHING COM ALTERAÇÕES FORA DO PLANO

À medida que *flaps* e *ailerons* rígidos substituíram gradualmente as asas flexíveis, as asas adaptativas de missão (*MAWs - Mission Adaptive Wings*) foram introduzidas em meados da década de 1980 para melhorar o desempenho de voo, deformando de forma flexível o aerofólio. O Laboratório de Pesquisa da Força Aérea dos EUA e a Boeing patrocinaram o programa chamado Integração Avançada de Tecnologia de Caça (*Advanced Fighter Technology Integration*), e o sistema *MAW* foi instalado e testado pela NASA em uma aeronave F-111. O sistema *MAW* usava motores hidráulicos como atuadores de transformação, computadores redundantes duplos como controladores de posição dos *flaps*, fibra de vidro flexível como revestimentos da superfície superior e painéis deslizantes como revestimentos da superfície inferior. *Flaps* de bordo de ataque e de fuga com curvatura variável foram construídos e permitiram uma transformação de curvatura suave e contínua e deformação do *flap* entre aproximadamente 1° para cima e

aproximadamente 20° para baixo, como mostrado na Figura 8. Os testes de voo confirmaram que o MAW melhora a carga aérea da asa em 15% no momento fletor constante e aumenta o alcance e a eficiência aerodinâmica em 20%, em linha com as melhorias de desempenho esperadas (Amse, 2018).

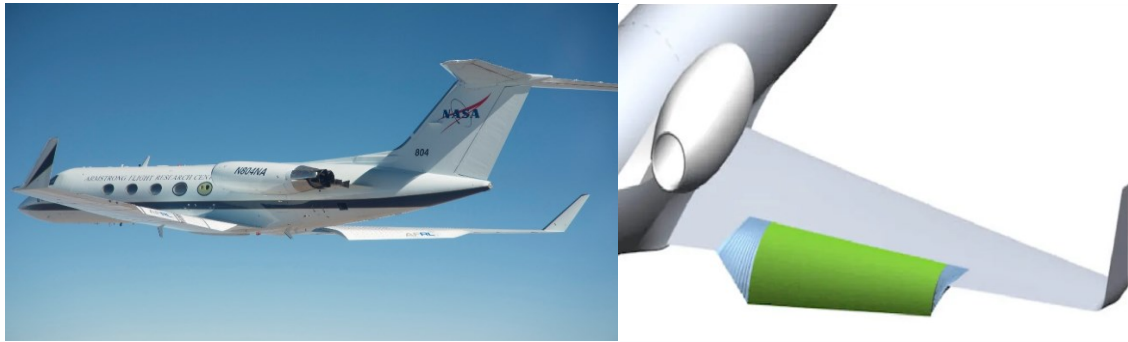
Figura 8 – Aeronave F-111 em voo com curvatura *morphing*: a) antes do *morphing* e b) após o *morphing*



Fonte: NASA, 2009.

Nos últimos anos, aeronaves comerciais começaram a experimentar projetos de curvatura devido aos avanços nos materiais e na engenharia de fabricação. Carenagens compatíveis foram montadas entre o segmento de transformação das asas e o segmento fixo para obter uma transição suave que pudesse reduzir o ruído. Os resultados dos testes de voo revelaram a transformação de curvatura de grande ângulo e torção de alta velocidade da tecnologia *FlexFoil™ ACTE*, bem como sua viabilidade estrutural, robustez estrutural, desempenho aerodinâmico, estabilidade de transformação e características de separação de fluxo, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Gulfstream III demonstrando a tecnologia da empresa FlexSys



Fonte: NASA, 2014.

Trabalhando com a NASA e a Força Aérea dos EUA, a empresa *FlexSys Inc.* desenvolveu um programa chamado *Adaptive Compliant Trailing Edge (ACTE)*. As superfícies de controle de geometria variável *FlexFoil™* do bordo de fuga permitiram que os *flaps* na plataforma de teste, um Gulfstream III, alcançassem uma transformação de curvatura perfeita. Em 2016, a *FlexSys Inc.* e a *Aviation Partners Inc.* revelaram uma nova asa demonstradora de tecnologia de transformação *FlexFoil™*, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Aerofólio de geometria variável *FlexFoil* desenvolvido pela empresa FlexSys.



Fonte: FLEXSYS, 2016.

Esta nova asa de demonstração apresenta quatro superfícies de controle ativas que podem se transformar suavemente para reduzir o arrasto, controlar a carga e melhorar a distribuição de sustentação. As quatro superfícies de controle também permitem controle de rotação, inclinação do bordo de ataque e degelo devido à nova tecnologia.

6. BENEFÍCIOS DO MORPHING E REDUÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS

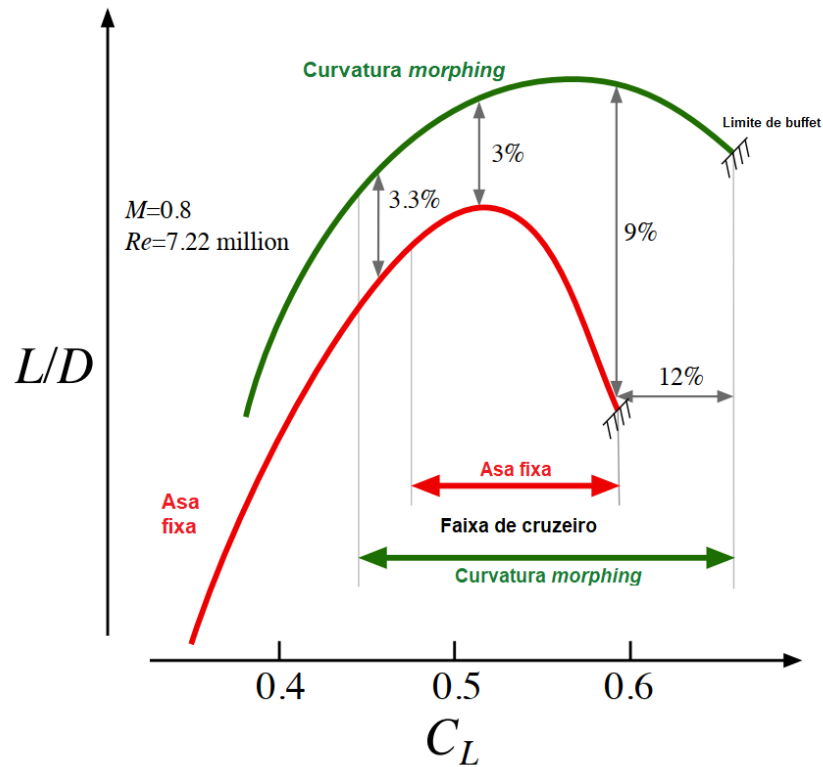
A maioria das pesquisas sobre transformação de aerofólio concentra-se na transformação da curvatura, porque a curvatura é o principal parâmetro que controla o coeficiente de sustentação ideal. Além disso, transformações no bordo de fuga são mais simples do ponto de vista do projeto estrutural, pois não interferem na totalidade estrutural da asa. Como mencionado no *morphing* fora do plano, essas alterações podem ser usadas para melhorar a distribuição de sustentação em toda a extensão da asa para redução de arrasto induzido, alívio de carga ou ambos.

Szodruch e Hilbig (1998) fornecem uma visão geral de vários esforços para projetar sistemas de curvatura variável para aeronaves de transporte e tentativas de quantificar o benefício de tais sistemas. A Figura 11 mostra um dos mais satisfatórios resultados deste artigo: o resultado de um teste em túnel de vento de um projeto de bordo de fuga *morphing*, que apresenta melhorias na razão sustentação/arrasto (L/D) entre 3% e 9%, juntamente com um aumento de coeficiente de sustentação de início de fluxo turbulento (*buffet*) de 12%. Esses ganhos são consequências do fato da asa de curvatura *morphing* ser mais robusta frente às tolerâncias de fabricação.

Há décadas os *ailerons* têm sido usados para criar diferenças entre as forças de sustentação que cada asa gera e assim promover o movimento de rolamento da aeronave, mas, apesar de vários estudos realizados na década de 1980 que mostraram as vantagens do *morphing* para desempenho aerodinâmico

de cruzeiro, as aeronaves ainda são projetadas para terem asa fixa no voo de cruzeiro.

Figura 11 – O bordo de fuga *morphing* aumenta o desempenho aerodinâmico em diferentes coeficientes de sustentação



Fonte: Adaptado de Szodruch e Hilbig, 1998.

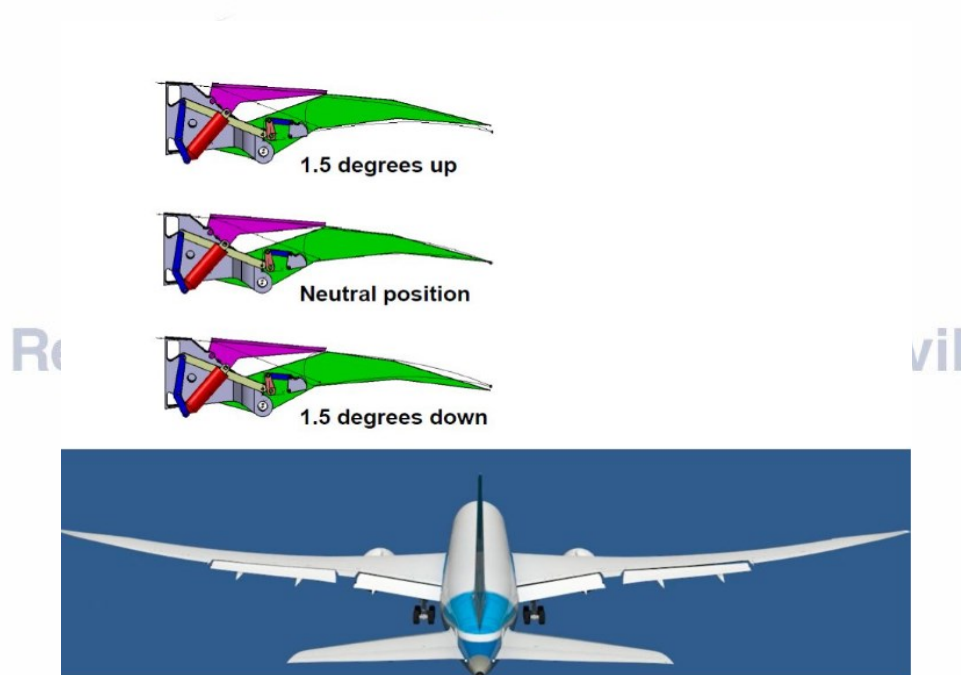
ISSN 2763-7697

O Airbus A350 e o Boeing 787 são os primeiros aviões de transportes comerciais a utilizar um sistema que desvia os *flaps* e *ailerons* de acordo com as condições do voo de cruzeiro para minimizar o consumo de combustível. Como as aeronaves de transporte modernas já possuem superfícies móveis ao longo da maior parte do bordo de fuga, os ajustes são extensos. No entanto, um sistema de transformação suave, sem dobradiças ao longo de todo o bordo de fuga, seria ainda melhor do ponto de vista aerodinâmico e também teria mais liberdade na adaptação da variação da curvatura em toda a extensão Reckzeh (2014).

No exemplo do Boeing 787, o projeto teve um dos enfoques na economia de combustível. Para isso, o peso do avião foi reduzido e melhorias no envelope de voo foram feitas, uma delas sendo a tecnologia *Trailing Edge Variable Camber*

(TEVC) ou bordo de fuga com curvatura variável, conforme representação na figura 12. O sistema TEVC consiste em duas funções que são alívio de carga (TEVC-LA) e redução de arrasto (TEVC-DR). Estas duas funções operam após os *flaps* serem recolhidos. O TEVC-LA (alívio de carga) opera durante as fases de subida. TEVC-DR (redução de arrasto) opera em voo de cruzeiro. As abas internas operam independentemente das abas externas para a função TEVC. Ocorre a deflexão da posição neutra do retalho interno. Uma deflexão interna dos retalhos é +/- 1,5º graus no máximo em incrementos de 0,5º graus. As posições de deflexão do retalho estão em baixa para TEVC-LA (Figura 12) Turan (2023).

Figura 12 – Representação gráfica da tecnologia *Trailing Edge Variable Camber* (TEVC) do Boeing 787



Fonte: Turan, 2023.

As posições de deflexão do retalho estão em alta para TEVC - DR. A deflexão do retalho é baseada no peso, velocidade e altitude do avião. A superfície dos retalhos retorna à posição neutra quando a altitude estiver abaixo do FL220 ou a velocidade abaixo de mach 0.70. A economia de combustível aproximada é de 750 a 1000 libras de peso do avião. (redução de aproximadamente 0,3 % no combustível do bloco/banco) Turan (2023).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS: REFLEXÕES SOBRE A TECNOLOGIA DE MORPHING

À medida que se conclui este estudo sobre asas adaptáveis ou *morphing*, é importante refletir sobre as descobertas e implicações que emergiram ao longo do processo de pesquisa. Primeiramente, os resultados obtidos neste estudo destacam a importância da continuidade de pesquisas e desenvolvimento da tecnologia *morphing*, por parte das disciplinas envolvidas. Ao examinar os benefícios da tecnologia, foi evidenciado o impacto substancial que a implementação do *morphing* em aeronaves pode ter na redução do consumo de combustíveis, devido ao menos arrasto induzido, e trazendo assim resultados positivos no aspecto da sustentabilidade, fornecendo insights valiosos para a aplicação prática.

Além disso, é crucial reconhecer as limitações deste estudo, como poucas pesquisas nacionais a respeito do conceito de *morphing* que por sua vez não abrirá caminho para conhecimento e desenvolvimento de materiais necessários para a implementação da tecnologia. Essas limitações oferecem oportunidades para melhorias e direções para pesquisas futuras. Sugere-se que futuros estudos possam abordar essas limitações, ampliando assim nosso entendimento da tecnologia *morphing*.

No âmbito prático, os resultados deste estudo têm implicações significativas para a comunidade aeronáutica, de engenharia e ambiental. Discussão sobre como os resultados podem ser aplicados ou influenciar práticas futuras.

Por fim, é importante destacar que esta pesquisa representa apenas um passo na jornada contínua de compreensão do *morphing*. Encorajamos pesquisadores e profissionais interessados a continuar explorando este campo dinâmico, aprofundando nosso conhecimento e impacto no desenvolvimento da tecnologia de *morphing* para aeronaves.

8 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, explorou-se o conceito da tecnologia de asas adaptáveis *morphing* e o seu potencial de melhoria de desempenho geral em aeronaves de asa fixa de transporte comercial. Ao longo do estudo, emergiram várias conclusões importantes que contribuem significativamente para o entendimento da referida tecnologia.

Os resultados obtidos neste estudo fornecem *insights* valiosos sobre o conceito, funcionamento, benefícios e impactos ambientais positivos que a tecnologia pode proporcionar. Demonstra-se que o *morphing* em um aerofólio reduz o arrasto, o que proporciona economia de combustível. Essas descobertas são fundamentais para incorporação de práticas sustentáveis e a redução da pegada ambiental da aviação civil, oferecendo orientação prática para empresas aéreas, governos e organismos ligados à indústria aeronáutica.

Além disso, reconhecemos algumas limitações em nossa abordagem, incluindo ausência de pesquisas nacionais a respeito do conceito de *morphing* que por sua vez não abrirá caminho para conhecimento e desenvolvimento de materiais necessários para a implementação da tecnologia, desenvolvimento de novos materiais e invenção de novos mecanismos de *morphing* e a melhoria contínua dos processos de *design*. Essas limitações sugerem oportunidades para futuras pesquisas, como sistemas de *morphing* mais exóticos, mais leves, mais eficientes em termos energéticos e econômicos.

Em suma, este estudo avança significativamente o conhecimento sobre a tecnologia de *morphing*, fornecendo uma base sólida para investigações futuras. Esperamos que as descobertas aqui apresentadas inspirem novas pesquisas e incentivem a aplicação prática dos resultados, o que não está muito distante, pois, conforme discutido neste artigo, a curvatura variável do bordo de fuga utilizando *flaps* convencionais, que começou no Boeing 787, foi proposta há quase três décadas. Agradecemos a todos os envolvidos neste processo e estamos ansiosos para ver como nosso trabalho contribuirá para o desenvolvimento contínuo do campo da teoria de voo, engenharia aeronáutica e disciplinas correlatas.

REFERÊNCIAS

ASME 2018 CONFERENCE ON SMART MATERIALS, ADAPTIVE STRUCTURES AND INTELLIGENT SYSTEMS, 2018, San Antonio. **Design of an Adaptive Twist Trailing Edge for Large Commercial Aircraft Applications**. San Antonio: Asme, 2018. 10 p.

EMILIAVACA, Angelo. **SMart Morphing Wing**: um protótipo de asa adaptativa acionada por micromolas de liga com memória de forma. 2016. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016. Disponível em:
<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/516/3/ANGELO%20EMILIAVACA%20-%20DISSERTA%c3%87%c3%83O%20PPGEM%202016.pdf>.
Acesso em: 24 abr. 2024.

NHAN NGUYEN (US). NASA Ames Research Center. **Development of Variable Camber Continuous Trailing Edge Flap for Performance Adaptive Aeroelastic Wing**. NASA Research Center, Moffett Field, v. 5, n. 1, p. 3-5, 15 set. 2015.
Disponível em:
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150023531/downloads/20150023531.pdf>.
Acesso em: 24 abr. 2024.

ÖZGEN, Serkan *et al.* Morphing Air Vehicle Concepts. **Proceedings Of The International Workshop On Unmanned Aerial Vehicles (UAV)**. Turquia, p. 46. 10 jun. 2010. Disponível em:
<http://www.ae.metu.edu.tr/~melin/PDFs/Conferences/UVW2010/UVW-2010-5.pdf>.
Acesso em: 24 abr. 2024.

PENDLETON, Edmund *et al.* Active aeroelastic wing flight research program: technical program and model analytical development. **Journal Of Aircraft**. San Antonio, TX, p. 554-561. jul. 2000.

PARKER, Humphrey Francis. **Varying camber by relatively-movable parts of wing structures**. US n. US1341758A. Depósito: 17 jul. 1919. Concessão: 01 jun. 1920. v. 01, n. 01, p. 01-01.

PARKER, Humphrey Francis. **The Parker Variable Camber Wing**. National Advisory Committee For Aeronautics, Washington, v. 5, n. 1, p. 9-9, 17 nov. 1920. Anual. Disponível em:
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930091138/downloads/19930091138.pdf>.
Acesso em: 24 abr. 2024.

RECKZEH, Daniel. Multifunctional Wing Moveables: design of the a350xwb and the way to future concepts. In: 29TH CONGRESS OF THE INTERNATIONAL COUNCIL OF THE AERONAUTICAL SCIENCES, 29., 2014, St. Petersburg. **Proceedings [...]**. St. Petersburg: International Council Of The Aeronautical Sciences, 2014. v. 1, p. 1-10.

SZODRUCH, Joachim; HILBIG, Reinhard. **Variable wing camber for transport aircraft**. 3. ed. Bremen: Elsevier, 1998. 25 v.

WEISSHAAR, Terrence. Morphing Aircraft Systems: historical perspectives and future challenges. **Jornal Of Aircraft**. Danvers, MA, p. 337-353. 30 mar. 2013.

Figura 1 - EMILIAVACA, Angelo. **Smart Morphing Wing**: um protótipo de asa adaptativa acionada por micromolas de liga com memória de forma. 2016. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/516/3/ANGELO%20EMILIAVACA%20-%20DISSERTA%20c3%87%20c3%83O%20PPGEM%202016.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2024.

Figura 2 - SILVA, Raphael Santana. **Análise da morfagem de winglets utilizando ligas com memória de forma**. 2018. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Cap. 3. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/12089/1/RaphaelSantanaSilva.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2024.

Figura 3 – Supersonic test plane uses 'wing warping'. **NewScientist**, 2002. Disponível em: <https://www.newscientist.com/article/dn2813-supersonic-test-plane-uses-wing-warping/>. Acesso em: 23 jun. 2024.

Figura 4 - MARTINS, Joaquim. **Fuel Burn Reduction Through Wing Morphing**. Wiley: Encyclopedia Of Aerospace Engineering, Green Aviation, 2016. 10 p.

Figura 5 - PARKER, Humphrey Francis. **Varying camber by relatively-movable parts of wing structures**. US n. US1341758A. Depósito: 17 jul. 1919. Concessão: 01 jun. 1920. v. 01, n. 01, p. 09.

Figura 6 - Experimental aircraft I.I. Makhonina Mak.10 / Mak.101 France. **Top War**, 2016. Disponível em: <https://en.topwar.ru/104295-eksperimentalnyy-samolet-ii-mahonina-mak10-mak101-franciya.html>. Acesso em: 10 jun. 2024.

Figura 7 - ZHU, Jihong *et al.* Design and applications of morphing aircraft and their structures. **Frontiers Of Mechanical Engineering: Machines and mechanisms, gears and transmissions, mechanical system dynamics**. Beijing, p. 1-20. 04 ago. 2023. Disponível em: <https://journal.hep.com.cn/fme/EN/10.1007/s11465-023-0750-6>. Acesso em: 20 maio 2024.

Figura 8 - **F-111 Advanced Fighter Technology Integration**. NASA, 2009. Disponível em: <https://www.nasa.gov/image-article/f-111-advanced-fighter-technology-integration-5/>. Acesso em: 22 jun. 2024.

Figura 9 – Gulfstream G-III Aerodynamics **Research Test Bed**. NASA, 2014. Disponível em: <https://www.nasa.gov/aeronautics/g-iii/>. Acesso em: 22 jun. 2024.

Figura 10 – **Improving Aerodynamics**. FlexSys, 2016. Disponível em: <https://www.flxsys.com/aero>. Acesso em: 22 jun. 2024.

Figura 11 – SZODRUCH, Joachim; HILBIG, Reinhard. **Variable wing camber for transport aircraft**. 3. ed. Bremen: Elsevier, 1998. 25 v.

Figura 12 – TURIN, Denis. **Trailing Edge Variable Camber (TEVC) Function on B787**. Istanbul, 23 ago. 2023. LinkedIn: Denis Turin. Disponível em: https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7093160565711282176?updateEntityUrn=urn%3Ali%3Afs_updateV2%3A%28urn%3Ali%3Aactivity%3A7093160565711282176%2CFEED_DETAIL%2CEMPTY%2CDEFAULT%2Cfalse%29. Acesso em: 10 jun. 2024.

