

UMA REVISÃO SOBRE A TECNOLOGIA DE AERONAVES DE GEOMETRIA ADAPTATIVA

Thiago de Paula Sales, Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. J. E. T. Reis, thiago@doutorado.ufu.br
Domingos Alves Rade, LMEst/UFU, IEM/ITA, domingos@ufu.br

Resumo: Este texto apresenta alguns dos principais estudos relacionados à tecnologia de aeronaves de geometria adaptativa. Inicialmente, uma breve contextualização histórica é apresentada. Na sequência, relações qualitativas tipo causa-efeito são consideradas para a constatação de quais benefícios podem resultar da adoção de geometria variável em aeronaves. Por fim, são considerados alguns dos principais trabalhos de pesquisa realizados acerca do assunto, algumas iniciativas tomadas pelo setor privado, bem como conceitos relatados na literatura. As principais conclusões indicam que grandes avanços já foram conquistados, como comprovam implementações funcionais observadas em aviões de combate, mas que esforços de pesquisa e desenvolvimento são necessários para que projetos de aeronaves de geometria adaptativa tornem-se eficazes, seguros e prática comum, dada a natureza multidisciplinar do tema.

Palavras-chave: Aeronaves de geometria adaptativa, materiais inteligentes, estruturas inteligentes, estruturas adaptativas.

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, o homem observa e aprende com a natureza. O desenvolvimento do voo autossustentado, por exemplo, começou no final do Século XIX, e início do Século XX, tendo como principal inspiração o voo de pássaros. É claro que a revolução industrial, bem como a compreensão de fenômenos físicos relacionados à mecânica dos fluidos, ajudaram a alavancar o campo da aeronáutica em momentos seguintes. Por outro lado, os primeiros projetos aeronáuticos foram fortemente influenciados pela imaginação humana. Prova disso são desenhos do inventor e engenheiro francês Clément Ader (1841-1925), que datam de antes de 1900; protótipos chegaram a ser construídos, mas nunca voaram [Fig. (1)]. Um contemporâneo de Ader foi o engenheiro alemão Otto Lilienthal (1848-1896), idealizador de planadores; com estes, registrou mais de 2000 voos entre os anos de 1891 a 1896, quando de um acidente fatal [Fig. (2)].

Fica clara, se analisados estes e outros casos, a tentativa de alçar voo por meio de inspiração na natureza. Animais que detêm a capacidade de voar o conseguem devido a evolução que apresentaram ao longo de milhões de anos. O homem, por sua vez, tentou copiar algumas das características mais marcantes destes animais, como as alterações geométricas associadas às asas de aves, por exemplo. Essas são utilizadas para levantar voo, gerar propulsão, garantir estabilidade, entre outros. Além disso, alterações geométricas também permitem a uma ave alterar entre voo nivelado, a realização de mergulho para caça, execução de manobras furtivas, etc.. Para exemplificar, o falcão peregrino é mostrado na Fig. (3) em situações distintas de voo; esta ave é capaz de realizar sobrevoos por longos períodos de tempo, e então mergulhar em alta velocidade para a captura de alimento.

Tomando por base o voo de pássaros, os irmãos Wright, ainda em 1902, propuseram o uso de torção de asa para realização do controle de voos autossustentados. Uma patente foi concedida para este tipo de aplicação, e o princípio foi usado no Wright Flyer, com a adoção de um sistema de cabos e polias, acionado pela movimentação lateral do piloto, que se posicionava deitado no protótipo de avião.

Com o passar do tempo, várias outras patentes que tinham como inspiração a natureza para auxiliar no controle de aeronaves foram registradas. A busca por maiores velocidades de voo, contudo, aliada à flexibilidade das estruturas então empregadas para construção aeronáutica, ocasionou acidentes aéreos devidos a fenômenos aeroelásticos, como divergência e flutter. Assim, logo na sequência da 1ª Guerra Mundial, aeronaves foram desenvolvidas com materiais mais rígidos, possibilitando maiores velocidades, mas limitando a aplicabilidade de sistemas inspirados na natureza para o

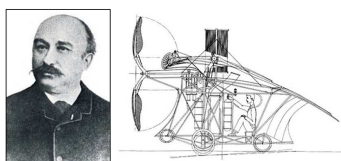


Figura 1. Clément Ader e um de seus protótipos.

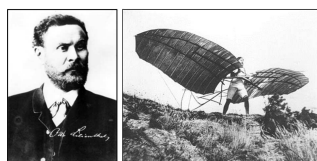


Figura 2. Otto Lilienthal e um de seus planadores.



Figura 3. Falcão peregrino em diferentes configurações de voo, como se vê através de suas asas e cauda.

controle de voo, por exemplo. Com isso, superfícies auxiliares, como flaps, slats, freios aerodinâmicos, etc., tornaram-se cada vez mais populares e presentes na aviação, desempenhando papel de controle ou de hiper-sustentação, conforme o caso (Weisshaar, 2013).

Independente da forma como acontece, é evidente a necessidade de reconfiguração geométrica para o voo de animais, ou de aeronaves, seja para possibilitar controle, propulsão, modificação de propósito, etc.. A adoção de superfícies auxiliares em aeronaves permanece até hoje devido a seu aperfeiçoamento, e a não necessidade de sua substituição. Por outro lado, hoje há a preocupação de se produzir aeronaves que sejam cada vez mais econômicas, ao menos na aviação civil. Flaps, por exemplo, levam a descontinuidades na superfície de sustentação, o que implica maior esforço devido ao arrasto aerodinâmico, e a um subsequente maior gasto energético. Além disso, superfícies auxiliares tradicionais também assumem responsabilidade por grande parte do ruído gerado nas etapas de decolagem e de aterrissagem de jatos comerciais. Por estes motivos, alternativas têm sido buscadas para o desenvolvimento de asas com geometria adaptativa, isto é, capazes de ter sua forma alterada, como realizam aves, por exemplo.

Ao longo do Século XX, este tipo de abordagem não foi completamente esquecida, como comprovam o contínuo registro de patentes, o desenvolvimento de protótipos, e a construção de aeronaves com asas de enflechamento variável, por exemplo (Weisshaar, 2013). Contudo, apesar de viabilidade ter sido comprovada em vários casos, em outros o acréscimo de peso e/ou custos resultavam proibitivos, muito em função dos sistemas empregados para atuação. Por este motivo, a consideração de asas com geometria adaptativa mostra-se vantajosa quase que exclusivamente quando requisitos conflitantes devem ser alcançados pelo projeto aeronáutico. Por outro lado, aeronaves que daí resultam muito provavelmente serão superiores em relação a outras alternativas, geralmente por serem versáteis graças a possibilidade de reconfiguração.

Outro ponto que merece destaque para o aumento de interesse relacionado a aeronaves com geometria adaptativa é o desenvolvimento dos denominados materiais inteligentes (Leo, 2007). Estes podem ser empregados como atuadores que dispõem de vantagens por serem compactos, possibilitar atuação distribuída, desempenhar simultaneamente função estrutural, e possuírem alta densidade energética ou altas taxas de resposta, conforme o caso. Sistemas de atuação que empregam tais materiais podem levar a uma redução de peso se considerados para comparação aqueles sistemas tradicionais de natureza hidráulica e/ou pneumática. Exemplos de materiais inteligentes compreendem materiais piezelétricos, ligas com memória de forma, fluidos magneto-reológicos e eletro-reológicos, etc..

Considerando o exposto anteriormente, o presente resumo expandido busca apresentar alguns dos principais avanços relacionados à tecnologia envolvida com aeronaves de geometria adaptativa. Na sequência, enfoque é dado às possibilidades até então consideradas para modificação geométrica. Projetos de pesquisa e conceitos expostos na literatura são então brevemente considerados. Por fim, conclusões são apresentadas.

2. O QUE ADAPTAR E POR QUÊ?

Como apontado por Jha e Kudva (2004), várias são as opções para reconfiguração geométrica de asas de aeronaves. De acordo com as teorias clássicas empregadas em seu projeto [como detalha Raymer (2012), por exemplo], influências podem ser estabelecidas de modo qualitativo como apresentado na Tab. (1). Por outro lado, o projeto de aeronaves com geometria adaptativa deve ser conduzido com cautela, tendo em vista que, como já mencionado, pode haver acréscimo de peso, e reconfiguração pode sobrecarregar um ou outro sub-sistema com demandas adicionais.

Tabela 1. Efeitos oriundos de alterações geométricas na asa sobre o desempenho de aeronaves (Jha e Kudva, 2004).

Parâmetro	Variação	Efeitos resultantes (com parâmetros restantes mantidos fixos)
Área planar da asa	+	Aumento na sustentação e na capacidade de carga
	-	Diminuição do arrasto parasita
Razão de aspecto	+	Aumento de L/D , do tempo de <i>loiter</i> , na distância de cruzeiro e nas taxas de curvas; Diminuição nos requisitos para motores
	-	Aumento da velocidade máxima; Diminuição no arrasto parasita
Ângulo de diedro	+	Aumento do momento de rolagem e da estabilidade lateral
	-	Aumento da velocidade máxima
Enflechamento	+	Aumento do $Ma_{crítico}$ e do efeito diedro; Diminuição do arrasto devido a ondas de choque
	-	Aumento do $(C_L)_{máx}$
Razão de afilamento	±	Eficiência da asa (distribuição da sustentação) e arrasto induzido
Distribuição de torção	±	Previne o stall de ponta de asa e altera a distribuição de sustentação
Curvatura do aerofólio	±	Modifica o ângulo de sustentação nula, a eficiência do aerofólio e o comportamento de separação
Razão espessura/corda	+	Aerofólio com melhor desempenho em baixas velocidades
	-	Aerofólio com melhor desempenho em altas velocidades
Raio do bordo de ataque	+	Aerofólio com melhor desempenho em baixas velocidades
	-	Aerofólio com melhor desempenho em altas velocidades
Distribuição de espessura	±	Modifica características do aerofólio, e a transição laminar/turbulento

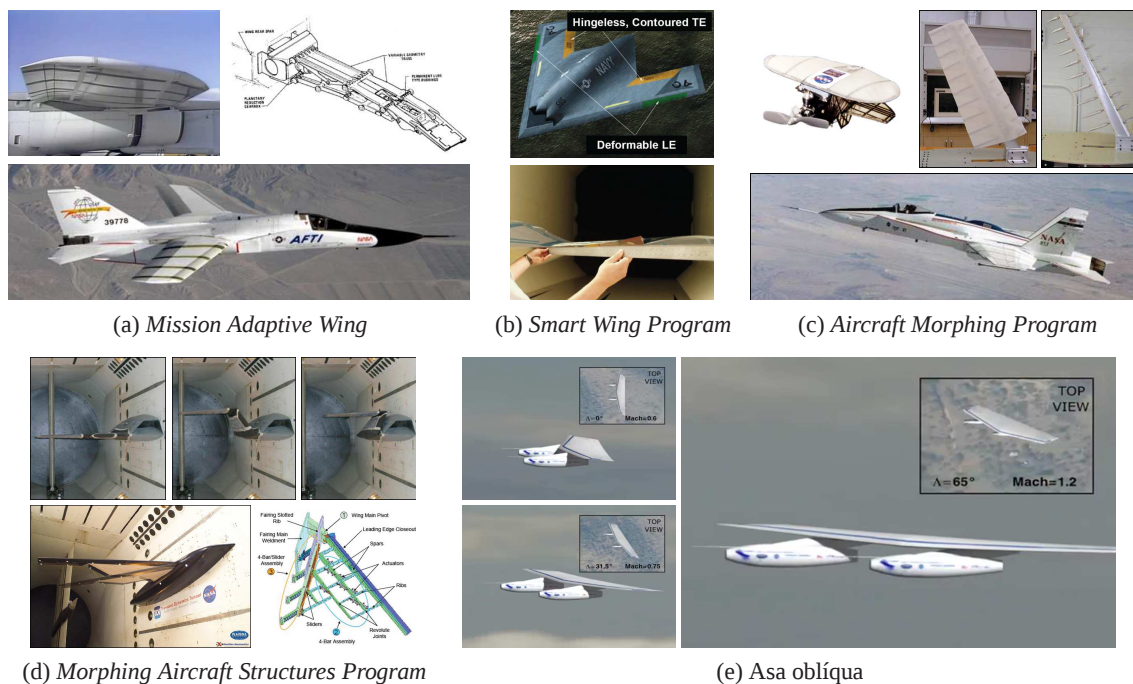


Figura 4. Principais iniciativas governamentais dos EUA relacionadas a aeronaves de geometria adaptativa.

Das possibilidades apontadas na Tab. (1), umas são, por razões construtivas, de implementação claramente mais fácil que outras. Barbarino *et al.* (2011) confirmam, por exemplo, que a maioria dos estudos recentes que lidam com aeronaves de geometria adaptativa visam alterações na curvatura de aerofólios e na distribuição de torção ao longo da asa. Modificações de enflechamento e de envergadura (alterações simultâneas da área planar da asa e de sua razão de aspecto) já foram relativamente bastante estudadas, e se encontram num estado maduro, a ponto de já terem permitido implementações funcionais. Poucos estudos interessaram-se por variações no ângulo de diedro e na flexão ao longo da envergadura de asas. Alterações na corda têm sido menos investigadas, já que trazem poucos benefícios e são muito desafiadoras do ponto de vista estrutural.

3. TRABALHOS RECENTES

Nos últimos anos, incontáveis trabalhos científicos foram publicados acerca de aeronaves com geometria adaptativa. Prova disto é a publicação de várias revisões bibliográficas, assim como de um livro a respeito do tema (Weisshaar, 2006; Thill *et al.*, 2008; McGowan *et al.*, 2009; Sofla *et al.*, 2010; Gomez e Garcia, 2011; Barbarino *et al.*, 2011; Taha *et al.*, 2012; Valasek, 2012; Vasista *et al.*, 2012; Weisshaar, 2013; Sinapius *et al.*, 2014; Barbarino *et al.*, 2014).

Grandes projetos de pesquisa realizados nos Estados Unidos da América incluem: o programa *Mission Adaptive Wing* (1975-1988); o *Smart Wing Program*; o *Aircraft Morphing Project* (NASA Langley, 1994-2004); e o *Morphing Aircraft Structures Program* (DARPA, 2002-2007). Lá, há ainda a investigação do uso de asas oblíquas, que conta com parceria entre a NASA e a DARPA, entre outras iniciativas. A Fig. (4) ilustra parte destas iniciativas.

Na Europa, o Centro Aeroespacial Alemão (DLR) é o principal responsável por diversos conceitos, como o *finger* e o *belt-rib*, mostrados na Fig. (5). Também foram pesquisados pelo instituto arqueamento variável no bordo de fuga, e a utilização de um *bump* para redução de arrasto em regime trans-sônico. Outros estudos tiveram como enfoque um bordo de ataque adaptativo; um protótipo fora construído para validação bem-sucedida do conceito.

Empresas privadas também mostram certo interesse no desenvolvimento de aeronaves adaptativas. A FlexSys desenvolveu o *adaptive compliant trailing edge* a partir de mecanismos flexíveis; as últimas notícias a respeito do protótipo de produto dão conta da realização de testes em voo. A Festo desenvolveu o *SmartBird*, que consiste em uma aeronave não-tripulada controlada remotamente, e que teve seus mecanismos de funcionamento e de voo completamente baseados na mecânica exibida por pássaros. Uma parceria entre a Bell e a Boeing resultou em uma aeronave extremamente versátil, o V-22 Osprey, que funciona como peça estratégica para as forças armadas norte-americanas.

Outros vários conceitos também foram apresentados na literatura. Estes compreendem a adoção de fios de liga com memória de forma; a aplicação de motores ultrassônicos piezelétricos; o emprego de *macro-fiber composites*; o uso de materiais compostos bi- ou multi-estáveis; entre outros. Vários trabalhos também se dedicam a modelagem e a métodos para análise de sistemas aeronáuticos com geometria adaptativa, tendo em vista a necessidade de projeto adequado.

4. CONCLUSÃO

Os vários trabalhos de pesquisa divulgados na literatura científica comprovam a relevância dos estudos acerca de aeronaves de geometria adaptativa. Vários avanços já foram conseguidos, como comprovam implementações operacionais

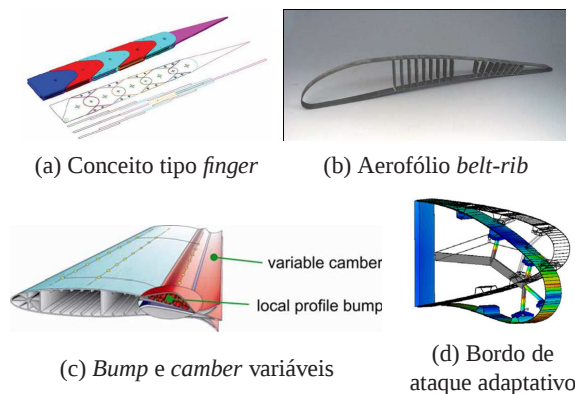


Figura 5. Conceitos desenvolvidos pelo DLR.

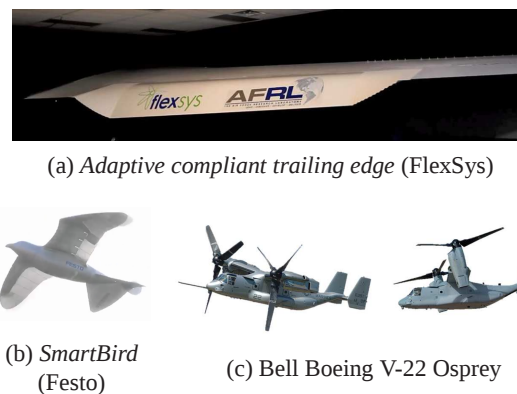


Figura 6. Envolvimento da iniciativa privada com aeronaves de geometria adaptativa.

que envolvem, por exemplo, enflechamento variável para operação de caças em regimes sub-, trans- e super-sônico. Pesquisas mais recentes buscam a integração de alternativas para atuação, visando redução de peso, e projetos mais adequados, pela distribuição de esforços de atuação.

Por outro lado, aeronaves com geometria variável ainda devem levar certo tempo para se tornar uma opção viável. Barbarino *et al.* (2011), por exemplo, mencionam que, de acordo com a NASA, 20 a 30 anos serão necessários para que as aeronaves tornem-se mais parecidas com pássaros, e deixem de ter superfícies de controle discretas para alterar sua forma de maneira mais fluida e contínua. Ademais, a natureza multidisciplinar associada a estruturas inteligentes adaptativas acarreta aumento significativo de complexidade ao projeto aeronáutico. Assim, vários avanços ainda se mostram necessários para a adoção de asas com curvatura variável, ou com distribuição de torção adaptativa, por exemplo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq, à FAPEMIG, ao INCT-EIE, e ao *Air Force Office of Scientific Research* pelo suporte financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Barbarino, S., Flores, E.I.S., Ajaj, R.M., Dayyani, I. e Friswell, M.I., 2014. "A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft". *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 6, pp. 063001–19.
- Barbarino, S., Bilgen, O., Ajaj, R.M., Friswell, M.I. e Inman, D.J., 2011. "A review of morphing aircraft". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22, No. 9, pp. 823–877.
- Gomez, J.C. e Garcia, E., 2011. "Morphing unmanned aerial vehicles". *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 10, pp. 103001–16.
- Jha, A.K. e Kudva, J.N., 2004. "Morphing aircraft concepts, classifications, and challenges". *Proc. SPIE 5388, Smart Structures and Materials 2004*, pp. 213–224.
- Leo, D.J., 2007. *Engineering Analysis of Smart Material Systems*. John Wiley & Sons.
- McGowan, A.M.R., Vicroy, D.D., Busan, R.C. e Hahn, A.S., 2009. "Perspectives on highly adaptive or morphing aircraft". In *NATO-RTO Applied Vehicle Technology Panel Symposium*. 14 p. RTO-MP-AVT-168.
- Raymer, D., 2012. *Aircraft Design: A Conceptual Approach*. AIAA Education Series, 5ª Edição.
- Sinapius, M., Monner, H.P., Kintscher, M. e Riemenschneider, J., 2014. "DLR's morphing wing activities within the european network". *Procedia IUTAM*, Vol. 10, No. 0, pp. 416–426.
- Sofla, A., Meguid, S., Tan, K. e Yeo, W., 2010. "Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges". *Materials & Design*, Vol. 31, No. 3, pp. 1284–1292.
- Taha, H.E., Hajj, M.R. e Nayfeh, A.H., 2012. "Flight dynamics and control of flapping-wing MAVs: a review". *Nonlinear Dynamics*, Vol. 70, No. 2, pp. 907–939.
- Thill, C., Etches, J., Bond, I., Potter, K. e Weaver, P., 2008. "Morphing skins". *The Aeronautical Journal*, Vol. 112, No. 1129, pp. 117–139.
- Valasek, J., 2012. *Morphing aerospace vehicles and structures*. John Wiley & Sons.
- Vasista, S., Tong, L. e Wong, K.C., 2012. "Realization of morphing wings: A multidisciplinary challenge". *Journal of Aircraft*, Vol. 49, No. 1, pp. 11–28.
- Weisshaar, T.A., 2006. "Morphing aircraft technology - new shapes for aircraft design". In *NATO-RTO Applied Vehicle Technology Panel Symposium*. 20 p. RTO-MP-AVT-141.
- Weisshaar, T.A., 2013. "Morphing aircraft systems: Historical perspectives and future challenges". *Journal of Aircraft*, Vol. 50, No. 2, pp. 337–353.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.