



DETERMINAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES ÓTIMAS DE WINGLETS EM AERONAVES USANDO TÉCNICAS DE META-MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO

Jorge Humberto Domingues do Prado Filho¹, João Marcelo Vedovoto², Aldemir Aparecido Cavalini Junior³, Fran Sérgio Lobato⁴

RESUMO: Em se tratando de componentes aeronáuticos, a geometria da asa apresenta grande influência sobre os coeficientes de sustentação e arrasto. Buscando reduzir uma parcela da força de arrasto visa-se a utilização de *winglets*. Todavia, para a obtenção da configuração ótima considerando estes parâmetros, uma vasta gama de experimentos é requerida. Visando alternativas aos tradicionais procedimentos experimentais, visto o custo embarcado, diversas técnicas computacionais vêm sendo empregadas. Neste cenário, a presente contribuição objetiva a obtenção de meta-modelos representativos para o sistema. Posteriormente, por meio de técnicas de otimização multi-objetivos busca-se determinar uma melhor configuração visando a relação arrasto/sustentação, empregando para a obtenção dos meta-modelos o Método Kriging. Os resultados obtidos demonstram a eficácia da metodologia proposta como alternativa para o tratamento destes problemas ao reduzir o tempo dedicado a realização de experimentos, obtendo concomitantemente melhores combinações entre as variáveis de projeto e que atendiam os dois objetivos propostos.

PALAVRAS-CHAVE: Forças de sustentação e arrasto, Fluidodinâmica computacional, Meta-modelagem, Kriging, Otimização Multi-objetivo.

DETERMINATION OF THE BEST WINGLETS SETTINGS IN AIRCRAFT USING META-MODELING AND MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION TECHNIQUES

ABSTRACT: In the case of aeronautical components, the wing geometry has a great influence on the lift and drag coefficients. Seeking to reduce a portion of the drag force is aimed at the use of winglets. However, to obtain the optimal configuration by considering these parameters, a wide range of experiments is required. Aiming at alternatives to traditional experimental procedures, considering the embedded cost, several computational techniques have been employed. In this scenario, the present contribution aims to obtain representative meta-models for the system. Subsequently, by means of multi-objective optimization techniques, it is sought to determine a better configuration aiming at the drag / lift relationship, using the Kriging Method to obtain the meta-models. The results obtained demonstrate the effectiveness of the methodology proposed as an alternative for the treatment of these problems by reducing the time spent conducting experiments, obtaining concomitantly better combinations between the project variables and meeting the two proposed objectives.

KEYWORD: Lift and drag forces, Computational Fluid Dynamics, Meta-modeling, Kriging, Multi-objective Optimization.

INTRODUÇÃO

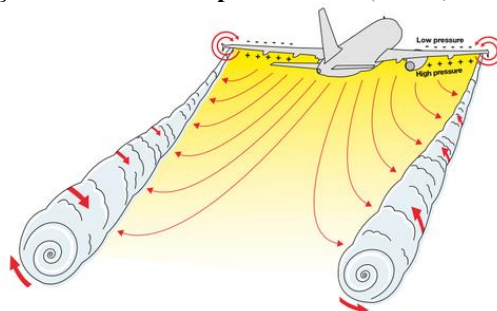
Em aerodinâmica, as forças de arrasto e de sustentação surgem quando um corpo quando imerso em um escoamento induz um movimento do fluido em sua vizinhança de forma que este possa transpor o objeto. Neste cenário, o aumento do número de Reynolds implica na formação de duas camadas cisalhantes livres na região imediatamente posterior ao corpo. Estas duas camadas apresentam vorticidade com sinais opostos, constituindo um sistema instável sob determinadas condições (Lelaie, 2016). Nas aeronaves os maiores efeitos aerodinâmicos acontecem por influência da asa. Isto se deve ao fato desta estrutura, na maioria das aeronaves, não ser “enxergado” pelo escoamento como um corpo rombudo. Assim, devido à presença da componente de sustentação da força aerodinâmica resultante, verifica-se uma menor densidade do ar passando pelo extradorso (parte superior) da asa em relação ao intradorso (parte inferior), resultando em recirculações denominados vórtices de ponta de asa. Estas por sua vez geram uma parcela de arrasto induzido relativamente grande, por ser esta decorrente da força de sustentação produzida (Lelaie, 2016).

¹ Discente, UFU, Uberlândia, Minas Geras, ² Docente, UFU, Uberlândia, Minas Geras

³ Docente, UFU, Uberlândia, Minas Geras, ⁴ Docente, UFU, Uberlândia, Minas Geras

Como alternativa para a redução de uma parcela da força de arrasto, nos últimos anos tem sido utilizado os *winglets*. Estes são componentes aerodinâmicos que são posicionados nas extremidades livres das asas das aeronaves, sendo geralmente da forma de uma aba vertical ou inclinada, conforme ilustrado na Fig. 1.

Figura 1: Vórtices de ponta de asa (Lelaie, 2016).



Fonte: Wake Vortices, C. Lelaie, *Airbus Safety First Magazine No. 21*, pp. 42-50, January 2016

Como consequência da presença destas estruturas, observa-se uma melhoria na eficiência das aeronaves possibilitando velocidades superiores graças à redução da componente de arrasto, além de prover uma atenuação no consumo de combustível. Apesar desta aparente vantagem, a forma destas estruturas influencia o desempenho das aeronaves. A determinação da geometria ótima dos *winglets* pode ser obtida a partir da realização de experimentos considerando diferentes configurações para as variáveis de projeto que mais influenciam esse processo. Todavia, devido ao elevado custo destes experimentos, nos últimos anos a literatura especializada tem utilizado a dinâmica computacional de fluidos (ou CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) como alternativa para minimizar o tempo dedicado ao projeto. Essa técnica, apesar de requerer um custo computacional relativamente alto para a resolução do sistema de equações algébricas governantes da dinâmica de fluidos, é capaz de promover uma análise do problema de interação fluido-estrutura com uma redução de custos bastante elevada, quando comparado aos experimentos reais. De posse destes experimentos sintéticos (oriundos da simulação usando CFD), pode-se obter meta-modelos para a representação dos fenômenos envolvidos no problema de interação fluido-estrutura.

Diante do que foi apresentado, esta contribuição tem por objetivo a otimização multi-objetivo para fins da minimização da força de arrasto e da maximização da força de sustentação via determinação de meta-modelos em função de três variáveis de projeto, a saber, a variação do comprimento do *winglet*, o ângulo de inclinação e a razão entre a corda da ponta do *winglet* e a da raiz do mesmo. Para essa finalidade, consideram-se as simulações realizadas a partir de combinações entre estas três variáveis de projeto para a obtenção das respectivas saídas, bem como o emprego do Método Kriging para a determinação dos meta-modelos empregados na otimização multi-objetivo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, todas as análises realizadas provêm de simulações computacionais. Para isso utilizou-se do código AMR3d (Nós (2007)), o qual faz uso de técnicas de refinamento adaptativo de malhas para discretizar o domínio computacional. Além disso, como a quantidade de experimentos realizados foi grande, necessitou-se utilizar o cluster Navier do Laboratório de Mecânica dos Fluidos (MFLab) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) para a paralelização das simulações.

Para a determinação das combinações que seriam simuladas numericamente, foi definido um planejamento fatorial (Barros Neto, B. et al.) contendo 27 experimentos numéricos, considerando três variações para cada uma das variáveis de interesse (variação do comprimento do *winglet*, ângulo de inclinação e a razão entre a corda da ponta do *winglet* e a da raiz do mesmo). Assim, para o primeiro algarismo desta sequência, que representa a variação do comprimento da *winglet*, tem-se a seguinte representação: -1 corresponde a 0,5 m; 0 corresponde a 1,0 m e +1 corresponde a 1,5 m. Para a segunda variável (ângulo de inclinação) tem-se a seguinte representação: -1 corresponde a 30°, 0 corresponde a 60° e +1 corresponde a 90°. Já para a última variável (razão entre a corda da ponta do *winglet* e a da raiz do mesmo), tem-se a seguinte representação: -1 corresponde a 0,5, 0 corresponde a 0,75 e +1 corresponde a 1.

Durante o processo de simulação numérica, a geometria imersa no escoamento em cada estudo de caso deve ser importada. Para essa finalidade, as diferentes geometrias foram construídas usando o *software* CATIA. Após esta etapa, cada configuração foi simulada considerando o código AMR3d e as forças de sustentação e arrasto foram determinadas. De posse destas forças, os meta-modelos para estas respostas foram determinados considerando o Método de Kriging, em função das três variáveis de projeto. Finalmente, com os meta-modelos, um problema de otimização multi-objetivo no qual considerada a minimização da força de arrasto e da maximização da força de sustentação foi proposto e resolvido considerando o algoritmo MODE (*Multi-objective Optimization Differential Evolution*), proposto por Lobato (2008), para a determinação da Curva de Pareto relacionado ao problema de otimização multi-objetivo.

RESULTADOS PARCIAIS/FINAIS

A Tabela 1 apresenta o planejamento considerado, bem como as respostas obtidas com a simulação do modelo matemático fenomenológico considerando os seguintes parâmetros código AMR3d. Para os experimentos, os parâmetros do escoamento utilizados foram fixados previamente mantendo um padrão de análises. A densidade, viscosidade e velocidade do fluido passante foram fixadas em $1 \frac{kg}{m^3}$, $0,0001 N * \frac{s}{m^2}$ e $1 \frac{m}{s}$ respectivamente, resultando em um número de Reynolds (Re) = 1×10^4 .

O Domínio (lbot), ou seja, a malha mais grosseira foi de elementos cúbicos de dimensão 0,96m de lado distribuídos nas direções X, Y, Z em respectivamente 16, 12 e 12 elementos em cada. Foram definidos 6 níveis de refinamento, no intuito de garantir uma relação entre as malhas euleriana e lagrangeana, resultando em uma malha mais refinada cujo dimensão do lado é de 0,03m.

Tabela 1 – Forças de arrasto (C_d) e sustentação (C_l) para cada um dos experimentos realizados.

Comprimento da Winglet (m)	Ângulo de Inclinação (°)	Afilamento	C_d	C_l
-1 (0,5)	-1 (30)	-1 (0,5)	0,1115633	-0,0080329
-1	-1	1 (1)	0,1151354	-0,0081405
-1	-1	0 (0,75)	0,1129351	-0,0092245
-1	1 (90)	-1	0,1119250	-0,0039204
-1	1	1	0,115926	-0,0047051
-1	1	0	0,1134789	-0,0051432
-1	0 (60)	-1	0,1125751	-0,0029613
-1	0	1	0,1125751	-0,0029613
-1	0	0	0,1133470	-0,0041969
1 (1,5)	-1	-1	0,1378902	-0,0098095
1	-1	1	0,1436473	-0,0060130
1	-1	0	0,1396207	-0,0110813
1	1	-1	0,1330315	-0,002502
1	1	1	0,1379561	0,0020930
1	1	0	0,1345572	0,0005519
1	0	-1	0,1394172	-0,0001349
1	0	1	0,1451626	-0,0009007
1	0	0	0,1411238	2,00E-05
0 (1,0)	-1	-1	0,1246981	-0,0075015
0	-1	1	0,2943221	-0,0064316
0	0	-1	0,1254548	-0,0012794
0	-1	0	0,1265590	-0,007847
0	1	-1	0,1267918	-0,0017456
0	1	1	0,1267918	-0,0017456
0	0	1	0,1302549	-0,003454
0	1	0	0,1243669	-0,0014573
0	0	0	0,1267642	-0,003773
Aerofólio sem winglet			0,1004675	-0,0081782

Fonte: Elaborado pelo autor

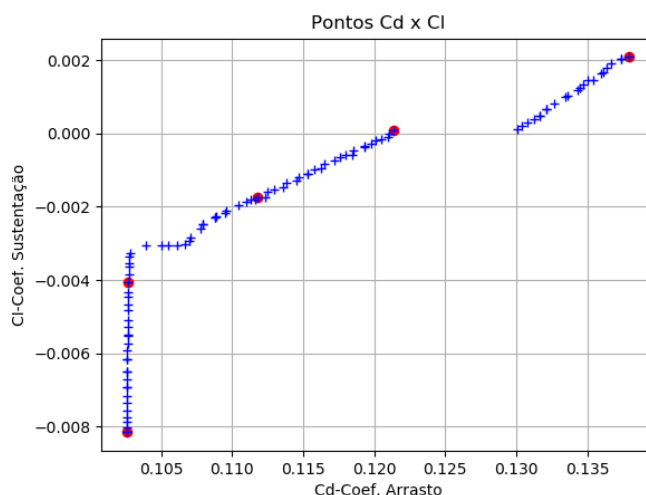
A partir das respostas apresentadas nesta tabela, o pacote DACE, implementado por Lophaven *et al.* (2002), que implementa o Método Kriging foi empregado para a determinação dos meta-modelos para os coeficientes de arrasto e sustentação. Neste foi considerado um modelo polinomial linear associado com um do tipo Gauss (Lophaven *et al.*, 2002).

Com a obtenção dos meta-modelos, o algoritmo MODE foi empregado para a determinação da Curva de Pareto para fins da maximização da sustentação e da minimização do arraste. Para essa finalidade, foram considerados os seguintes parâmetros: tamanho da população igual a 100; probabilidade de cruzamento, taxa de perturbação e taxa de redução iguais a 0,9, respectivamente; número de pseudo-curvas igual a 10 e número de gerações iguais a 250. Os limites laterais para cada uma das variáveis de projeto foram definidos no domínio [-1 1]. Com estes parâmetros, o número total de avaliações da função objetivo é igual a $100 + 100 \times 250$.

A Figura 2 apresenta a Curva de Pareto para o problema em análise. Nesta figura percebe-se que

quando se aumenta o coeficiente de sustentação, o coeficiente de arrasto diminui. Além disso, também se observa um ponto (C) para o qual existe uma brusca direção na derivada que representada por esta curva. Isto se deve ao atendimento das restrições laterais em relação ao critério de dominância de Pareto. A Tabela 2 apresenta alguns pontos da Curva de Pareto. Nesta observa-se valores mínimos para que o ângulo (30°), o que representa o ângulo de inclinação da winglet. Já as outras duas variáveis de projeto, observa-se variações positivas das variáveis codificadas demonstrando uma melhor configuração para winglets, demonstrando que não necessariamente a configuração deve apresentar um maior afilamento e menor comprimento de winglet, o que intuitivamente é levado em consideração ao considerar apenas o coeficiente de arrasto.

Figura 2: Curva Pareto para a maximização da sustentação e da minimização do arrasto.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2: Resultados obtidos através da curva de Pareto.

	Comprimento da Winglet (m)	Ângulo de Inclinação ($^\circ$)	Afilamento	Arrasto	Sustentação
A	-0,810592	-0,999265	-0, 370957	0, 102554	-0,008159
B	-0,799967	-0, 889734	-0, 360086	0, 102695	-0,004071
C	-0,253795	-0, 968317	-0, 988212	0, 111812	-0,001731
D	0,992971	0, 135827	-0, 322772	0, 121336	0,000008
E	0,975045	0, 999443	0, 999157	0, 137968	0,002088

Fonte: Elaborado pelo autor

CONCLUSÕES

A presente aplicação teve por objetivo apresentar uma metodologia sistemática para a determinação da geometria de *winglets* na asa de aeronaves via otimização dos coeficientes de sustentação e arrasto. De forma geral, observa-se que quando se aumenta o coeficiente de sustentação, o coeficiente de arrasto aumenta. Além disso, também se observa que o ângulo, para os pontos apresentados, em sua maioria, assumiu o seu valor mínimo ou máximos. Já para as outras duas variáveis, observa-se, praticamente, variações negativas das variáveis codificadas. Finalmente, objetiva-se em trabalhos futuros avaliar a otimização no que tange robustez e confiabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] Wake Vortices, C. Lelaie, *Airbus Safety First Magazine No. 21*, pp. 42-50, January 2016
- [2] BARROS NETO, Benício; SPACINO SCARMINIO, Ieda; EDWARD BRUNS, Roy. **Como Fazer Experimentos: Aplicações na Ciência e na Indústria**. 2. ed. [S.l.]: Unicamp, 2002. 400 p.
- [3] LOBATO, Fran Sérgio. **Multi-objective optimization for engineering system design**. 2008. 402 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- [4] VEDOVOTO, João Marcelo. **Modelagem matemática e simulação numérica de escoamentos incompressíveis sobre geometrias complexas tridimensionais utilizando o método da fronteira imersa**. 2007. 149 p. Tese (MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, [S.l.], 2007.
- [5] S. N. Lophaven, H. B. Nielsen, J. Søndergaard, **DACE - A MATLAB Kriging Toolbox**, Version 2.0, August 1, 2002, Technical University of Denmark DK-2800 Kgs. Lyngby – Denmark.