

Uso do Algoritmo Genético na Otimização Multiobjetivo da Geometria de Empenas de Foguetes de Sondagem

Alexandre Nogueira Barbosa¹, Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães²

¹Programa de Doutorado em Computação Aplicada – CAP
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

²Instituto de Estudos Avançados – IEAv
Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial – DCTA

¹nogueiraanb@iae.cta.br, ²guimarae@ieav.cta.br

Abstract. *Over the years, new methods have allowed to identify best engineering solutions more easily. So far, the Brazilian rockets were not benefited with improvements produced from these methods. Among them, the VS-40 is highlighted. Thus, motivated by the search for improvements in subsystems of this rocket, this work aims to optimize its fins using genetic algorithm. As a result, the drag caused by the fins could be reduced up to 29%.*

Resumo.

Ao longo dos anos, novos métodos vêm permitindo que soluções melhores de engenharia sejam mais facilmente identificadas. Até o momento, os foguetes brasileiros não foram beneficiados com melhorias produzidas a partir desses métodos. Dentre eles, destaca-se o VS-40. Assim, motivado pela busca por melhorias em subsistemas desse foguete, o objetivo deste trabalho é otimizar suas empenas usando algoritmo genético. Como resultado, o arrasto provocado pelas empenas pôde ser reduzido em até 29%.

Palavras-chave: *Foguetes de sondagem, Projeto de empenas, Algoritmo genético.*

1. Introdução

No desenvolvimento do projeto de foguetes de sondagem, realizam-se simulações para avaliar como certas geometrias de empenas afetam a estabilidade aerodinâmica do foguete. A busca por uma geometria ótima é um processo de tentativa e erro, no qual pode haver objetivos conflitantes. Por exemplo, quando se tenta melhorar a estabilidade, aumentando a área da empena, o desempenho do foguete é penalizado, pois ele acaba sofrendo mais arrasto. No entanto, o arrasto causado pela empena não é apenas função de sua área, mas também de sua geometria.

A definição da geometria das empenas através de otimização é uma abordagem nova no contexto dos foguetes de sondagem brasileiros, onde destaca-se, por exemplo, o VS-40. No final da década de 90, o VS-40 foi apresentado como aquele, dentre os foguetes brasileiros, que provê as melhores condições para experimentos em microgravidade [Ribeiro 1999, p. 241]. Pode-se dizer que o VS-40 é um sistema complexo. Sistemas desse tipo são governados por vários fenômenos físicos que interagem entre si, e, além

disso, eles requerem o equilíbrio entre objetivos conflitantes relacionados a segurança, confiabilidade, desempenho, operabilidade e custo [Rowell e Korte 2003, p. 2].

Ao longo do tempo, novos métodos aplicados à engenharia de sistemas complexos vêm permitindo que soluções melhores, que atendem globalmente aos objetivos de projeto, sejam mais facilmente identificadas [Rowell e Korte 2003, p. 5]. Esses métodos constituem a metodologia *Multidisciplinary Design Optimization* (MDO). Entretanto, o VS-40 não foi beneficiado, até o momento, com melhorias produzidas a partir da aplicação do MDO. Assim, motivado pela busca por melhorias em subsistemas do VS-40, este trabalho tem por objetivo aplicar o MDO na otimização das empenas desse foguete. Para realizar essa otimização, utiliza-se um algoritmo genético baseado na versão não geracional multiobjetivo [Borges e Barbosa 2000]. Este trabalho incorpora os modelos computacionais de duas disciplinas: aerodinâmica e trajetória. Por este motivo, a otimização é dita multidisciplinar.

Este artigo está organizado como segue. Primeiro, na Seção 2, discorre-se sobre o algoritmo genético não geracional multiobjetivo, com ênfase no operador real desenvolvido neste trabalho. A definição do problema de otimização segue na Seção 3, onde são apresentadas as variáveis, os objetivos e as restrições do problema. Na Seção 4, apresentam-se os valores atribuídos aos parâmetros do algoritmo de otimização. Os resultados da otimização são discutidos na Seção 5. Finalmente, na Seção 6, sugerem-se os trabalhos futuros e, na Seção 7, conclui-se o artigo.

2. Algoritmo de otimização

O algoritmo genético não geracional é adequado para problemas multiobjetivo porque preserva as soluções que estão próximas da fronteira de Pareto [Valenzuela-Rendón e Uresti-Charre 1997, p. 660]. Primeiro, o algoritmo gera e avalia a população inicial. Então, ele realiza um número predefinido de iterações. Em cada iteração, o algoritmo gera dois novos indivíduos a partir da combinação de dois indivíduos da população, selecionados por elitismo. O mais apto desses novos indivíduos substitui o menos apto da população, o pior indivíduo, a menos que este seja melhor do que o novo indivíduo. Apesar da denominação atribuída a esse algoritmo, “não geracional”, cada iteração é considerada uma nova geração, dado que ao menos um indivíduo pode ser introduzido na população.

Emprega-se um operador real, cujo desenvolvimento é uma contribuição original deste trabalho. Essa denominação deve-se ao fato de ser concebido para uso com números reais, ao invés de binários. Esse operador permite o uso de números reais como forma de codificação da solução, e substitui os operadores de recombinação e mutação binários, originalmente incorporados no algoritmo genético. Seu funcionamento consiste nos seguintes passos. Primeiro, atribuem-se valores apropriados aos parâmetros desse operador: o coeficiente de mutação (c), o expoente inferior de mutação (k_{inf}) e o expoente superior de mutação (k_{sup}), onde o primeiro parâmetro é um número real e os dois últimos são números inteiros. Em seguida, aplica-se o operador em cada indivíduo escolhido para gerar um novo indivíduo. Dado um indivíduo, uma variável de projeto (v) é escolhida aleatoriamente. Então, um inteiro (k) é gerado aleatoriamente entre k_{inf} e k_{sup} , e um número real (p) é gerado aleatoriamente entre 0 e 1. Finalmente, um novo valor para v é gerado, somando o seu valor original com um incremento (m), o qual é dado por

$$m = \begin{cases} -tv, & \text{se } p = 0; \\ t(1-v), & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

onde

$$t = c \cdot e^{-k/2} \quad (2)$$

Quanto maior for o valor de c , mais diversificada será a busca (Eq.(2)). Quanto mais diversificada, mais global. No entanto, o importante é usar o parâmetro c para equilibrar a diversificação e intensificação da busca, a fim de evitar avaliações excessivas da função objetivo, no caso da diversificação pesar mais do que a intensificação, ou a convergência prematura, no caso contrário.

3. Definição do problema

O problema de otimização pode ser definido como segue. Dada a configuração original do VS-40 com uma carga útil de 240 kg, quer-se otimizar a geometria de suas empenas, a fim de minimizar a força de arrasto causada por elas e maximizar o menor intervalo entre os instantes críticos do voo. Os instantes críticos são: passagem pelo regime de voo transônico, pressão dinâmica máxima, margem estática mínima e cruzamento das frequências de rolamento e arfagem. É importante evitar a ocorrência simultânea desses instantes, pois podem tornar as condições de voo mais agressivas à estrutura do foguete. O regime de voo transônico refere-se às velocidades desenvolvidas entre Mach 0.8 e 1.4, em que a onda de choque se forma e pode causar forte instabilidade. A pressão dinâmica máxima está normalmente relacionada com o ponto de máximo carregamento aerodinâmico. Sabe-se, porém, que a empena tem pouquíssima influência sobre o instante desses dois eventos. Eles estão mais associados à propulsão e distribuição de massa do foguete. Por outro lado, os dois últimos eventos são diretamente afetados pela geometria da empena, pois estão associados à aerodinâmica do foguete. A margem estática, por exemplo, é função do centro de pressão (Fig.(1)). Nele atuam as forças aerodinâmicas. O centro de pressão varia em função da velocidade do foguete, mas de forma também associada à geometria da empena.

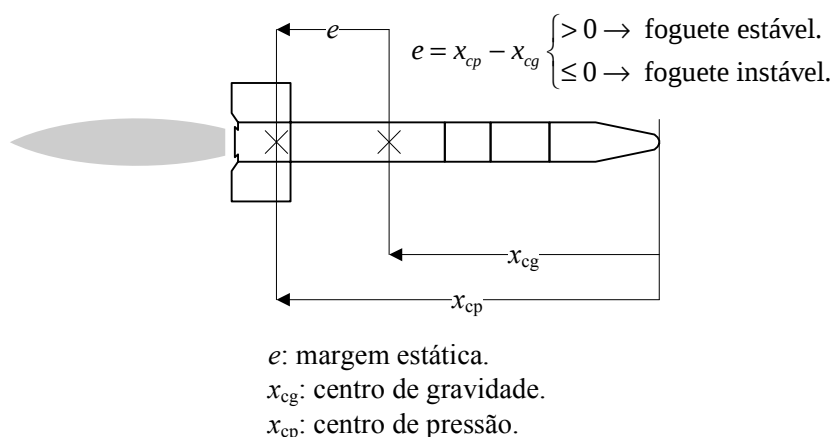


Figura 1. Ilustração do conceito da margem estática.

Em geral, recomenda-se que a margem estática mínima esteja entre 1.5 e 2 calibres, onde 1 calibre refere-se ao maior diâmetro do corpo central do foguete [Nakka 2001]. Se a margem estática for positiva porém pequena, abaixo de 1 calibre, o foguete

continuará estável, mas sujeito a oscilações excessivas que podem danificá-lo ou comprometer seu desempenho. O instante da margem estática mínima é crítico porque o foguete pode ficar sujeito a um regime maior de oscilações. O cruzamento das frequências de rolamento e arfagem pode induzir o fenômeno físico denominado *roll resonance* seguindo por outro fenômeno chamado *roll lock-in*, onde a curva da taxa de rolamento desvia-se do caminho desejado [Cornelisse et al. 1979, p. 330].

Para avaliar a função multiobjetivo, empregam-se dois códigos computacionais de alta fidelidade, um de aerodinâmica, denominado *missile datcom* [Blake 1998], e outro de trajetória, denominado *rocket simulation* (ROSI) [Ziegltrum 1984].

O VS-40 é um foguete bi-estágio com apenas um conjunto de empenas, distribuídas de forma cruciforme, localizadas em sua cauda. Suas empenas possuem aerofólio hexagonal. Seu painel é constituído de dois segmentos. Neste problema, explora-se, como variáveis de projeto, os parâmetros da geometria do segundo segmento e o ângulo de incidência da empena (Fig.(2)).

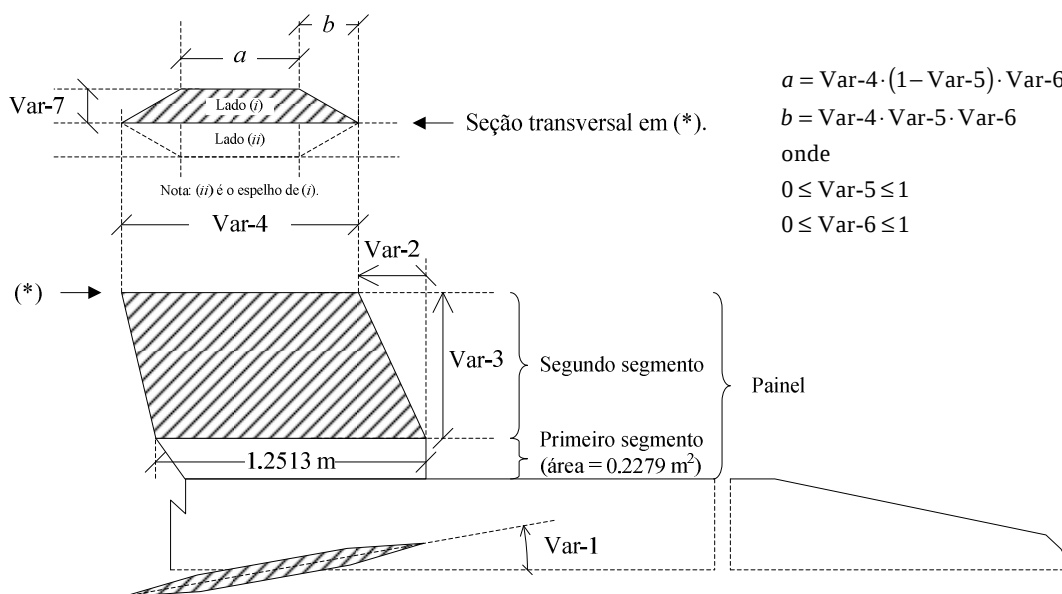


Figura 2. Variáveis de projeto.

Na Tab.(1), apresentam-se os limites das variáveis de projeto, os quais definem o espaço de busca.

Tabela 1. Limites das variáveis de projeto.

Variáveis	Valor nominal	Limite inferior	Limite superior
Var-1 (graus)	0.6	0.42	0.6
Var-2 (m)	0	0	2.4843
Var-3 (m)	0.7095	0.7095	0.9095
Var-4 (m)	1.2513	1	1.2513
Var-5	0.348038	0.348038	0.417646
Var-6	0.799168	0.719	0.959002
Var-7 (m)	0.016783	0.011748	0.016783

Os limites inferiores e superiores apresentados na Tab.(1) foram definidos de modo que as soluções geradas representassem geometrias típicas de empenas.

As restrições do problema são as seguintes:

$$\text{Taxa de rolamento} \leq 2.3 \text{ Hz e}$$

$$\text{Margem estática} \geq 1.4 \text{ calibres.}$$

É importante manter a taxa de rolamento abaixo do valor admissível para o VS-40, pois se ela ultrapassar esse valor, isso poderá afetar a estrutura do foguete. Quanto ao limite inferior da margem estática, mantem-se o que é praticado com respeito a esse foguete.

4. Parâmetros da otimização

Na Tab.(2), apresentam-se os valores atribuídos aos parâmetros do algoritmo genético não geracional multiobjetivo, abordado na Seção 2.

Tabela 2. Parâmetros do algoritmo de otimização.

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	20
Número de gerações	600
Raio de vizinhança ⁽¹⁾	2
Fator de graduação ⁽¹⁾	0.5
Coefficiente de mutação (c) ⁽²⁾	1.4
Expoente inferior de mutação (k_{inf})	1
Expoente superior de mutação (k_{sup})	6
Precisão	0.001

Nota:

- ⁽¹⁾ Parâmetros da função de aptidão, os quais regulam a distribuição das soluções ao longo da fronteira de Pareto [Borges e Barbosa 2000].
- ⁽²⁾ Valor que por tentativa e erro resultou até agora no melhor compromisso entre a diversificação e intensificação da busca.

5. Resultados

Em primeiro lugar, uma questão que não era óbvia a priori é respondida, o resultado da otimização mostra que os objetivos do problema são conflitantes, pois a distribuição das soluções indicam a formação de uma curva de Pareto (Fig.(3)).

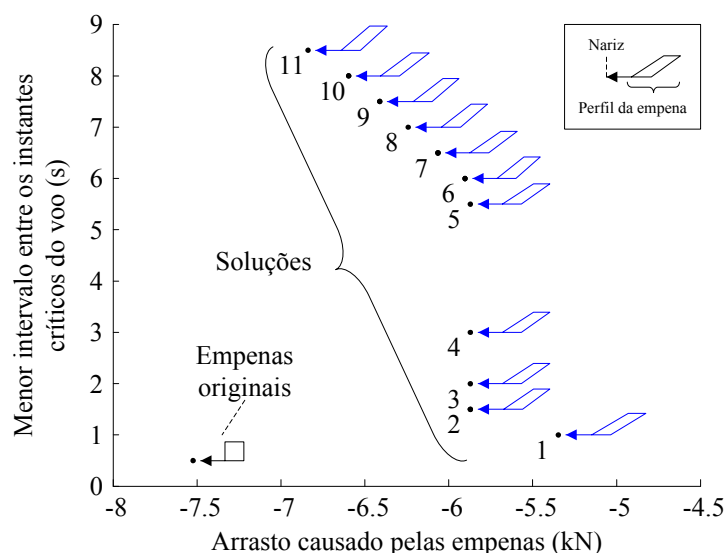


Figura 3. Resultado da otimização.

Aparentemente, as soluções ficaram bem distribuídas. No entanto, apesar da população ter 20 indivíduos (Tab.(2)), apenas 11 pontos são observados na Fig.(3). Ocorre que alguns desses indivíduos resultam no mesmo ponto.

O resultado da otimização mostra-se coerente. O intervalo entre o instante da passagem pelo transônico e o da pressão dinâmica máxima é de 15 s, não importa o perfil de empena que seja usado. Os resultados não excederam esse intervalo (Fig.(3)).

O arrasto causado pelas empenas pôde ser reduzido em até 29% (Solução 1, Fig.(3)). Na Fig.(3), o eixo das abscissas representa o arrasto causado apenas pelas empenas e não o arrasto total suportado pelo foguete. Sem empenas, o arrasto total é de -40.24 kN. Assim, em termos do arrasto total, a redução é de até 5%.

Fato interessante é que as soluções são 2.8% a 19.6% maiores em área do que as empenas originais (Fig.(4)). Geralmente, a área tem mais impacto sobre o arrasto do que a geometria da empena. Contudo, apesar de as soluções terem uma área um pouco maior do que as empenas originais, o arrasto produzido por elas é menor.

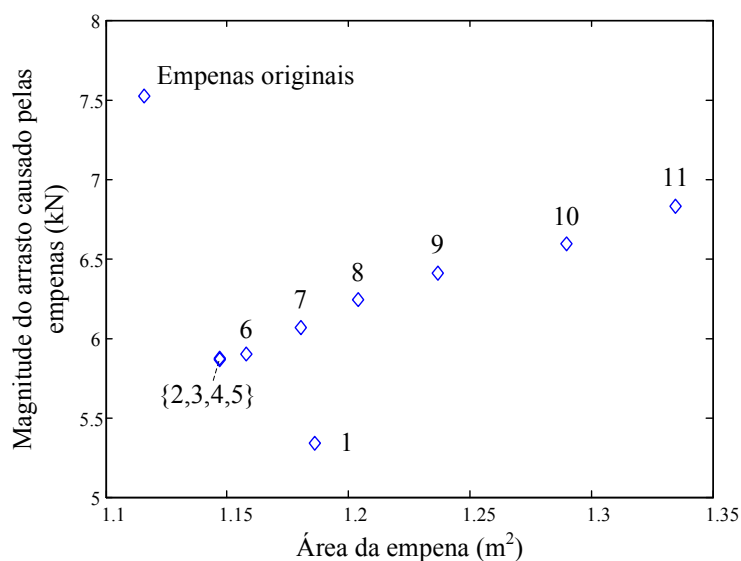


Figura 4. Arrasto versus área da empena (as soluções estão ordenadas conforme apresentado na Fig.(3)).

As empenas originais possuem uma geometria retangular. Esse tipo de geometria é o que causa maior arrasto no regime de voo supersônico em comparação com os outros tipos com mesma área e distância entre a base e extremidade da empena [Fleeman 2006, p. 52]. Dado que a maior parte do voo do VS-40 ocorre em regime supersônico, a geometria retangular não é a mais adequada para minimizar o arrasto. Este estudo reforça, portanto, que as empenas do VS-40 podem ser melhoradas.

6. Trabalhos futuros

Em trabalhos futuros, outras disciplinas poderiam ser incorporadas ao problema de otimização. Por exemplo, com respeito às áreas de propulsão e estruturas, códigos específicos poderiam ser incorporados, respectivamente, para gerar a curva de empuxo a partir de parâmetros do propelente e da geometria interna do motor, e para avaliar a resistência estrutural do foguete em função das cargas aerodinâmicas.

7. Conclusão

Motivado pela busca por melhorias em subsistemas do VS-40, o objetivo deste trabalho foi aplicar a metodologia *Multidisciplinary Design Optimization* (MDO) na otimização das empenas desse foguete, usando o algoritmo genético não geracional multiobjetivo. Em primeiro lugar, apresentou-se, em linhas gerais, como essa versão do algoritmo genético procede, descrevendo os parâmetros e o funcionamento do operador real desenvolvido neste trabalho (Seção 2). Além disso, comentou-se sobre a importância de equilibrar a diversificação e intensificação da busca através da regulagem dos parâmetros desse operador. Em segundo lugar, definiu-se o problema de otimização (Seção 3). Os objetivos do problema foram apresentados. Os parâmetros da geometria da empena e seu ângulo de incidência foram definidos como variáveis de projeto. Colocaram-se restrições para evitar soluções inviáveis do ponto de vista estrutural. Em terceiro lugar, apresentaram-se os valores atribuídos aos parâmetros do algoritmo de otimização (Seção 4). Em quarto lugar, discutiram-se os resultados da otimização (Seção 5), onde ficou evidente que os objetivos são conflitantes, questão que não era óbvia antes de executar a otimização. Os resultados mostraram-se coerentes. Apesar de as soluções serem ligeiramente maiores em área do que as empenas originais, o arrasto provocado por elas pôde ser reduzido em até 29%. Em quinto e último lugar, sugeriu-se, em trabalhos futuros, a incorporação de modelos computacionais de mais duas disciplinas: propulsão e estruturas (Seção 6).

Referências

- Blake, W.B. (1998), Missile Datcom User's Manual – 1997 Fortran 90 Revision, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA.
- Borges, C.C.H., Barbosa, H.J.C. (2000), A non-generational genetic algorithm for multiobjective optimization, in proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, La Jolla, pp. 172-179.
- Cornelisse, J.W., Schöyer, H.F.R., Wakker, K.F. (1979), Rocket Propulsion and Spaceflight Dynamics, Pitman, London, 505 p.
- Fleeman, E.L. (2006), Tactical Missile Design, 2nd edition, AIAA, Reston, 468 p.
- Nakka, R.A. (2001), Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site, <www.nakka-rocketry.net/fins.html>.

Ribeiro, T.S. (1999), Veículos Lançadores de Satélites – Cenário Atual e Futuro, Parcerias Estratégicas, No.7, pp. 235-247.

Rowell, L.F., Korte, J.J. (2003), Launch Vehicle Design and Optimization Methods and Priority for the Advanced Engineering Environment, National Aeronautics and Space Administration (NASA), Hampton, Virginia, NASA/TM-2003-212654, 29 p.

Valenzuela-Rendón, M., Uresti-Charre, E. (1997), A non-generational Genetic Algorithm for multiobjective optimization, in proceedings of the 7th Int. Conf. on Genetic Algorithms, Sao Mateo, pp. 658-665.

Ziegltrum, W. (1984), Analysis and Specification of Trajectory Program ROSI, Input Program WEIGHT, Plot Program ROSIPLOT, DFVLR TN 12/76, Vol.1.