

ANÁLISE DE TRANSFERÊNCIAS ORBITAIS IMPULSIVAS UTILIZANDO ALGORÍTMO GENÉTICO

**Anderson Rodrigo Barretto Teodoro¹, Denilson Paulo Souza dos Santos²
Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado³**

¹ETEP Faculdades/Engenharia da Computação, Av. Barão do Rio Branco, 882, São José dos Campos
^{2,3}INPE/Divisão de Mecânica e Controle, Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos
¹andersonrteodoro@gmail.com, ²denilson.paulo@gmail.com, ³prado@dem.inpe.br

Resumo: Este trabalho tem como objetivo analisar a implementação de algoritmos genéticos nos problemas de transferências orbitais impulsivas, visando obter o menor consumo de combustível para uma missão, integrando o desenvolvimento e implementação de algoritmos para a transferência de Lambert, integração numérica através do método Runge-Kutta de 4ª Ordem e de um algoritmo de resolução que utiliza algoritmos genéticos. O objetivo foi buscar o mínimo consumo de combustível para os impulsos necessários entre as manobras de transferência, considerando órbitas circulares e coplanares. Para a dinâmica do problema foi considerado o modelo tradicional do Problema Restrito de Três Corpos e foi assumido que os três corpos envolvidos são pontos de massa e não sofrem perturbações externas ao sistema. Como resultado preliminar, obteve-se o código para o cálculo do mínimo incremento total de velocidade necessário para realizar as manobras de transferência, analisadas através da aplicação da transferência de Lambert, buscando o mínimo consumo de combustível entre as manobras.

Palavras-chave: Algoritmos Genéticos, Transferências Orbitais, Otimização
Área do Conhecimento: Engenharia Aeroespacial e Computação

Introdução

O estudo de manobras orbitais tem grande importância para aplicações em missões espaciais, como nos momentos em que é necessário realizar transferências do veículo espacial de uma órbita a outra ou mesmo quando por determinados motivos é necessário executar correções nos parâmetros orbitais do veículo espacial (Prado, 2012).

Para isso, é importante considerar durante as manobras de transferências os gastos de combustível, responsável por fornecer os devidos impulsos para realizar as manobras necessárias, visto em Santos (2009), que esses gastos são consideravelmente altos em uma missão espacial, e que muitas vezes seu fim também pode determinar o final de uma missão.

Sendo assim, a otimização realizada pela busca por soluções que minimizem o consumo de combustível de uma missão é um tema de estudo muito importante e conseqüentemente já abordada em diversos estudos, como recentemente em Santos e Prado (2012) e Santos et al. (2012), pois quanto menor o consumo necessário entre as transferências, menor também será o custo da missão, maior o tempo de vida útil do veículo e conseqüentemente maior o aproveitamento da missão espacial, além de permitir no futuro, a busca por novos objetivos, ampliando ainda mais o conhecimento através da exploração espacial.

Metodologia

O desenvolvimento do trabalho envolveu o estudo dos conceitos básicos de mecânica e controle, método de integração numérica utilizando Runge-Kutta de 4ª ordem, tipos de manobras clássicas e algoritmos genéticos.

Neste trabalho, foi utilizada a transferência de Lambert para as manobras, onde a partir do tempo necessário para a transferência e dos valores dos raios da órbita inicial R_0 e final R_f , são obtidos os valores dos dois impulsos necessários para realizar a transferência até a órbita final desejada. As equações utilizadas na transferência de Lambert são descritas em Curtis (2010).

O problema da transferência de Lambert foi modelado com uma órbita inicial e final fixas, mais duas órbitas intermediárias entre a inicial e final, geradas através do algoritmo genético.

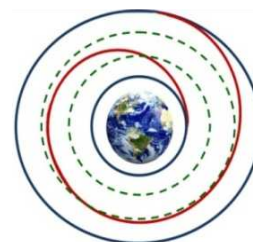


Figura 1. Demonstração da metodologia utilizada para a transferência de Lambert.

Assim, baseado na demonstração da Figura 1, a partir da definição do ponto inicial da primeira órbita fixa, é realizada a transferência até a primeira órbita intermediária, depois o veículo é transferido para a segunda órbita intermediária até alcançar à órbita final desejada.

Para a integração da órbita de transferência, foi utilizado o método para integração numérica do tipo Runge-Kutta de 4ª ordem, sendo obtido a partir das séries de Taylor, assim como o método de segunda ordem. Este método é considerado um dos mais utilizados na solução numérica de problemas com equações diferenciais ordinárias. De acordo com KIUSALAAS (2005), a maior desvantagem deste método de integração é a impossibilidade de obter uma estimativa do erro de truncamento, sendo necessário adivinhar o tamanho do passo de integração por meio da tentativa e erro.

Assim, o integrador foi aplicado nas equações da dinâmica do movimento em função do tempo de transferência e o passo de integração, descritas em (SANTOS e PRADO, 2012) por:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{r}} &= \vec{v} \\ \dot{\vec{v}} &= -\frac{\mu}{r^3} \vec{r} + \vec{\Gamma} \\ \dot{c} &= \Gamma \end{aligned} \quad (1)$$

Onde:

- Γ é a aceleração devido ao empuxo e mede o combustível gasto.
- μ é a constante gravitacional universal.
- \dot{c} é a variação do combustível consumido, dado por:

$$\dot{c} = \Gamma = m_0 - m_f = -\frac{T}{C} \cdot t \quad (2)$$

Onde:

- T é o nível do impulso, considerando constante e equivalente a 2,70 mN em UA.
- C é o impulso específico, considerando constante e equivalente a 1550s.

As equações da dinâmica do movimento foram modeladas em 7 estados para facilitar as simulações computacionais: x_p, y_p, z_p para posição, x_v, y_v, z_v para velocidade e c para controle do consumo de combustível.

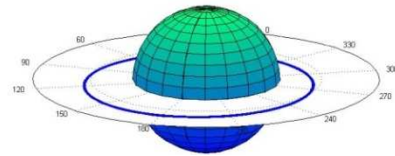


Figura 2. Aplicação do integrador nas equações da dinâmica do movimento.

A busca pela otimização do consumo de combustível necessário para os impulsos nas manobras de transferências, foi realizada através de algoritmos genéticos. Esses algoritmos são uma heurística de otimização global, baseados nos mecanismos de seleção natural e biologia evolutiva. Assim, os algoritmos genéticos modelam uma solução para um problema específico, criando uma estrutura de dados como a de um cromossomo e aplicando operadores genéticos que recombinam estas estruturas preservando informações ótimas obtidas a cada geração, conforme abordado em Linden (2008), de forma que ao decorrer do tempo, os indivíduos a cada geração vão se tornando cada vez melhores adaptados ao meio.

Para testar a qualidade e o desempenho do algoritmo genético, foi utilizada a função de Griewank como função objetivo, aplicada para testar o desempenho do algoritmo na busca pelo mínimo global ao longo da função.

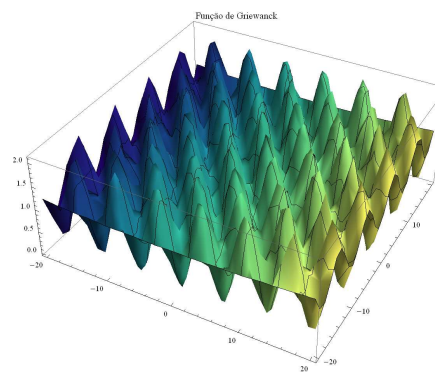


Figura 3 – Demonstração dos picos dos mínimos e máximos locais da função de Griewank.

Como observado na Figura 3, a função de Griewank é uma função multimodal que apresenta diversos máximos e mínimos distribuídos de maneira praticamente uniforme ao longo do intervalo de busca. Além disso, o valor do mínimo global é muito próximo ao valor encontrado nos mínimos locais, isso torna difícil a busca pelo mínimo global da função, caracterizando-a como uma boa função para testar o desempenho dos algoritmos genéticos.

Para a aplicação dos algoritmos genéticos no problema abordado, considerou-se uma população inicial de 100 indivíduos com probabilidade de cruzamento de 70%, mutação correspondente a 0,5% e epidemia correspondente a 0,05% de ocorrência.

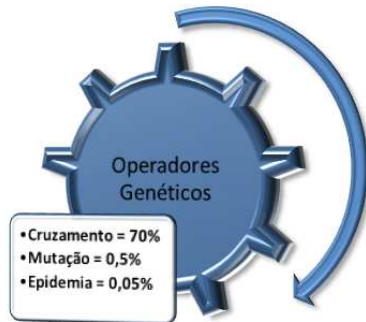


Figura 4. Esquema da probabilidade para aplicação dos operadores genéticos.

Para a seleção dos indivíduos utilizou-se o método de seleção por roleta, onde cada indivíduo da população corresponde a uma solução candidata, sendo codificado de forma binária, considerando 16 bits para cada variável.

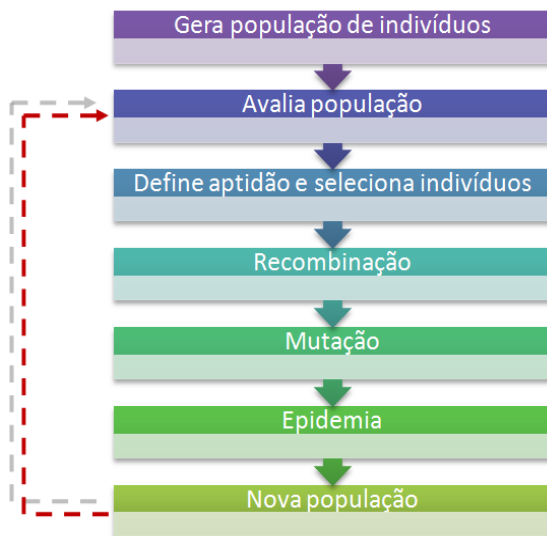


Figura 5. Esquema do GA desenvolvido

Em cada caso, a função objetivo foi avaliada 10.000 vezes durante 50 gerações, sendo esta as equações da transferência de Lambert, tendo como parâmetros de entrada o valor do Raio inicial e final, buscando as melhores trajetórias intermediárias para minimizar o valor do impulso ΔV total necessário para realizar as manobras de transferência entre as órbitas inicial e final desejada.

Resultados

Para as trajetórias geradas a partir do integrador Runge-Kutta de 4ª ordem, considerando os propulsores ligados com baixo empuxo, foi obtido o resultado, apresentado na Figura 6.

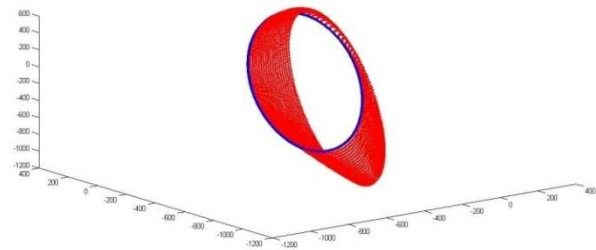


Figura 6. Trajetória do veículo espacial com as órbitas aumentando com o tempo, de acordo com o impulso ΔV aplicado pelo propulsor.

Para o teste do algoritmo genético, foi obtido o resultado apresentado na Figura 7.

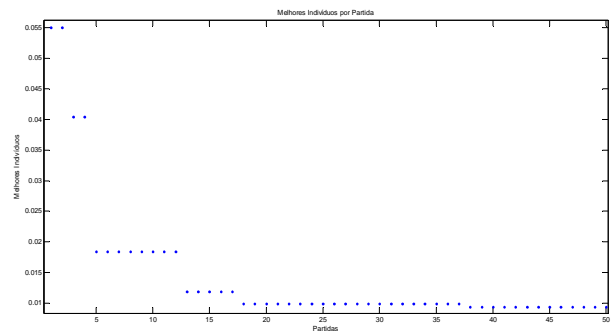


Figura 7. Melhores indivíduos de cada geração.

Para a integração completa dos códigos do integrador numérico Runge-Kutta de 4ª ordem com a transferência de Lambert e o algoritmo genético, obteve o resultado apresentado na Figura 8.

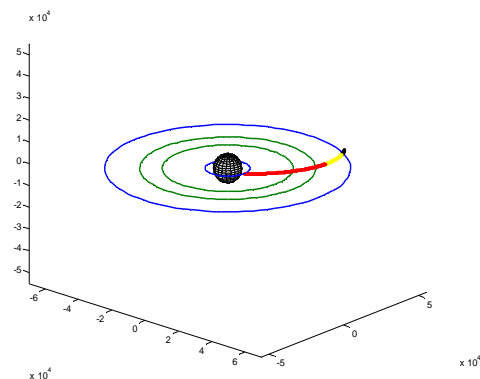


Figura 8. Manobra de transferência completa.

Discussão

A questão em análise é a forma como é modelado à aplicação dos diversos tipos de manobras clássicas no problema de transferências, sabendo que já existem alguns tipos de manobras otimizadas, como a transferência de Hohmann. Porém, quando são consideradas perturbações no sistema, é necessário realizar mudanças na modelagem do problema, tornando-se necessário a incorporação de outros métodos para otimização do sistema, como por meio de estratégias evolutivas.

Assim, sabendo que na prática o sistema abordado não é ideal, podendo sofrer diversos tipos de perturbações, como as causadas pela atração gravitacional dos corpos e pela pressão de radiação solar, torna-se necessário considerar ao longo do estudo os principais tipos de perturbações para aumentar cada vez mais a precisão dos resultados nas simulações computacionais.

Dessa forma, o estudo e a incorporação de ferramentas para otimização, como as estratégias evolutivas, por meio da implementação de algoritmos genéticos, torna-se muito interessante para ser aplicado nessa classe de problemas.

Conclusão

Os códigos desenvolvidos forneceram bons resultados em aplicações testes, tanto para o algoritmo genético, minimizando os valores da função objetivo, quanto para o integrador numérico Runge-Kutta de 4ª ordem e a transferência de Lambert.

A partir desta etapa, esta sendo analisada uma nova metodologia para integração do código, implementando os algoritmos genéticos aplicado a populações de Δt , para encontrar as melhores soluções em que é obtido o menor impulso ΔV necessário, identificando os momentos mais apropriados para realizar a manobra de transferência de uma órbita a outra, considerando perturbações externas ao sistema.

Agradecimentos

Á Deus, a FAPESP pelo apoio financeiro recebido através da bolsa de Iniciação Científica, aos orientadores Dr. Denilson Paulo Souza dos Santos e Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado pelo conhecimento transmitido, ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por ceder o espaço e suas instalações e aos amigos e familiares pelo apoio.

Referências

CURTIS, H. D. **Orbital Mechanics for Engineering Students**, 2ª edition, 2010.

KIUSALAAS, J. **Numerical Methods in Engineering with Python**, Cambridge University Press, New York, 2005.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da Inteligência Computacional**, 2ª Edição. Brasport, Rio de Janeiro, 2008.

PRADO, A. F. B. A. **Apostila da 16ª Escola de Verão de Dinâmica Orbital e Planetologia** – UNESP, Guaratinguetá - SP, 2012.

SANTOS, D. P. S. **Otimização de trajetórias espaciais com propulsão elétrica solar e manobras gravitacionalmente assistidas**, Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologias Espaciais e Controle, São José dos Campos: INPE, 2009.

SANTOS, D. P. S.; PRADO, A. F. B. A. **Optimal Low-Thrust Trajectories to Reach the Asteroid Apophis**. *wseas transactions on applied and theoretical mechanics*, v. 7, p. 241-251, 2012.

SANTOS, D. P. S.; PRADO, A. F. B. A.; Colasurdo, G. **Four-Impulsive Rendezvous Maneuvers for Spacecrafts in Circular Orbits Using Genetic Algorithms**. *Mathematical Problems in Engineering (Print)*, v. 2012, p. 1-16, 2012.