**Projeto de IC**

**Universidade Federal do ABC – UFABC**

**Título:** APLICAÇÃO DAS SUPERESTRADAS INTERPLANETÁRIAS NAS TRAJETÓRIAS DE CUBESATS NO SISTEMA TERRA-LUA

**Palavras-chave:** Superestradas Interplanetárias, Pontos de Lagrange, Problema Restrito dos Três Corpos, Problema Bicircular dos Quatro Corpos, GMAT/JPL/NASA, missão espacial Lunar IceCube, sistema Terra-Lua.

Declarado o Interesse por Bolsa

São Bernardo do Campo

Junho 2022

1. **RESUMO**

Na última década, diversos avanços impulsionaram a indústria aeroespacial, desde os pequenos CubeSats até os mais poderosos sistemas de propulsão e transporte. Telescópios mais potentes foram desenvolvidos, que acoplam tecnologias de última geração para uma melhor observação do universo e de sua composição, como o telescópio espacial James Webb, lançado em dezembro de 2021. Mais além, avanços nas simulações e modelagens computadorizadas tornaram possível a aplicação de novas trajetórias de missões para veículos espaciais (V/Es) baseadas em conceitos mais complexos, como as Superestradas Interplanetárias.

As Superestradas Interplanetárias são o conjunto de soluções para o Problema dos Três Corpos Restrito. Essas soluções descrevem trajetos que permeiam todo o nosso Sistema Solar, aproveitando-se da existência dos Pontos de Lagrange – pontos de equilíbrio gravitacional entre corpos celestes capazes de comportarem uma órbita – para criar uma rede de transporte interplanetário, com baixíssimo custo de combustível e energia, na qual um V/E poderia seguir de forma natural, o que resultaria também em poucas correções durante o trajeto. Este conceito está sendo cada vez mais aplicado nos desenvolvimentos de diversas missões atuais, sendo em trajetórias de CubeSats e até mesmo em órbitas de futuras estações espaciais. [1]

O foco desse projeto é entender e estudar as trajetórias geradas pelos Pontos de Lagrange no Problema dos Três Corpos e aplicá-las no cálculo, modelagem e simulação de trajetórias no sistema Terra-Lua. O estudo fará uso do software “open source” da Agência Aeroespacial Estadunidense (NASA), o ‘General Missions Analysis Tool’ (GMAT).

Este projeto terá como base, principalmente, os artigos científicos elaborados por Martin Wen-Yu Lo e será uma continuação da pesquisa anterior sobre o mesmo tema (PDPD 2021-2022), de maneira a aprofundar e aplicar os conceitos ali apresentados.

As informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho serão encontradas em literaturas e artigos científicos, bem como materiais acadêmicos de revistas científicas, palestras, apresentações e conferências de pesquisadores em geral, do Jet Propulsion Laboratory (JPL/NASA), em particular [1] [2] [3].

Serão feitas algumas modelagens no software GMAT[[1]](#footnote-1) à fim de compreender a aplicação prática dos conceitos que serão abordados.

Os resultados desta pesquisa serão apresentados em dois relatórios, um parcial e outro final, reunindo todo o conhecimento adquirido no processo.

Espera-se que o conhecimento adquirido e apresentado nos relatórios, ainda bem incipientes no Brasil, possam ser difundidos e estudados mais amplamente no país, para análise de sua aplicação em missões espaciais futuras.

1. **INTRODUÇÃO**

O período do Renascimento Cultural (séculos XIV a XVII), marcou o início da revolução científica e a crescente valorização e conscientização de sua importância. Desde então, a pesquisa científica cresceu exponencialmente à medida em que o obscurantismo científico deu espaço para a educação.

Da mesma forma, o século XX também foi marcado por diversas revoluções no campo científico, e uma das principais foi o surgimento da indústria aeroespacial. As pesquisas aplicadas desenvolvidas no contexto da corrida espacial abriram caminho para grandes realizações, como o lançamento de satélites, veículos espaciais em órbita da Terra e para longe dela, e o pouso na Lua.

Atualmente, em um ambiente mais pacífico de cooperação global, a indústria aeroespacial desenvolve-se amplamente em vários países, o Brasil inclusive, favorecendo o surgimento de novas tecnologias e a possibilidade de resolução de problemas e aplicação de conceitos que, antes, eram puramente teóricos.

O Problema Restrito dos Três Corpos é um grande exemplo destes conceitos. Foi resolvido e posteriormente aplicado nas missões espaciais por meio de simulações computacionais e modelagens. Este problema aborda a existência de três corpos com massa, m1, m2 e m3, sendo esse último constituinte de uma massa ínfima comparada aos outros dois. É desejável saber o movimento deste corpo de massa desprezível, que orbita o sistema formado pelos corpos m1 e m2. [4] [5] [6]

As soluções desse problema são descritas como trajetórias espaciais geradas pelos pontos de equilíbrio gravitacional desse problema, conhecidos como Pontos de Lagrange. Esses pontos são capazes de abrigar órbitas, que podem ser aproveitadas para o transporte interplanetário por todo o Sistema Solar. O conjunto de todas as trajetórias possíveis de serem geradas por um ponto de Lagrange, que adentram ou saem das órbitas em volta desse ponto, são chamadas de Superestradas Interplanetárias. Em cada sistema de três corpos, existem cinco pontos. Três deles são colineares e condizem com o plano das órbitas do sistema, e dois deles formam triângulos equiláteros, como na figura abaixo, que representa a localização do Telescópio Espacial James Webb, da NASA, no ponto L2 do sistema Sol-Terra. [7]

Diagrama

Descrição gerada automaticamente

Figura 1 - Ilustração do sistema Sol-Terra-Telescópio Espacial James Webb, evidenciando tanto os pontos colineares quanto os triângulos equiláteros formados por L4 e L5. Fonte: FORTES, E. et al. Rev. Bras. Ensino Fís. 2018

Em pesquisa anterior, foi realizado o estudo introdutório do Problema Restrito dos Três Corpos, bem como dos Pontos de Lagrange, Superestradas Interplanetárias e a aplicação delas em missões espaciais, com foco em trajetórias que CubeSats podem adentrar no sistema Terra-Lua geradas pelos pontos de libração (outra denominação para os pontos de equilíbrio rotacional e gravitacional do Problema dos Três Corpos).

Diagrama, Esquemático

Descrição gerada automaticamente

Figura 2 - Exemplo simplificado (fora de escala) da transferência de um objeto em órbita em volta do ponto L1 do sistema Terra-Lua (LL1). O objeto aproveita de uma trajetória gerada pelo ponto L2 do sistema Terra-Lua (LL2) à fim de adentrar uma órbita em volta do ponto L2 do sistema Terra-Sol (EL2). Daí, o objeto pode seguir para o Sistema Solar exterior. Fonte: PERES, Victor Ayres. 2022.

Por meio do estudo realizado anteriormente, foi possível perceber que a aplicação do conceito das Superestradas nas missões espaciais pode reduzir significativamente os custos destas, aumentando a sua viabilidade para países com menor aporte financeiro. Também foi possível concluir que o conceito de CubeSat interplanetário é perfeitamente alcançável, ou seja, que lançar CubeSats para além da órbita terrestre é exequível. Essas conclusões foram realizadas com base no estudo de missões como a Hiten – realizada pela Agência Espacial Japonesa – e a missão Lunar IceCube, que está prevista para ser lançada junto da missão Artemis, em 2022. Além disso, na pesquisa citada, uma simulação introdutória para entender o uso do software GMAT foi feita e serviu de base para um aprofundamento nas modelagens que serão realizadas neste projeto.

Este trabalho tem como objetivo estudar as Superestradas Interplanetárias geradas no sistema Terra-Lua e aplicação delas nas trajetórias de CubeSats com destino ao satélite natural da Terra de uma forma mais aprofundada do que foi feito anteriormente. Serão estudados o Problema dos Três Corpos e o Problema Bicircular dos Quatro Corpos, como também serão realizadas simulações computacionais no software GMAT.

1. **OBJETIVOS**

Como objetivo geral da pesquisa, o estudo das Superestradas Interplanetárias geradas no sistema Terra-Lua e a aplicação delas nas trajetórias de CubeSats com destino à Lua.

O projeto tem como objetivos específicos os seguintes tópicos:

**I –** Estudo aprofundado dos conceitos envolvidos, formação das Superestradas, trajetórias e uso para navegação.

**II** – Estudo do Problema Restrito dos Três Corpos e relação deste com as Superestradas.

**III** – Estudo das variedades invariantes do sistema Terra-Lua e os mapas de Poincaré dos pontos colineares de Lagrange.

**IV** - Estudo do “L1 Lunar Gateway Habitat” e como o ponto L2 do sistema Terra-Lua pode servir de ponte para o Sistema Solar exterior.

**V** – Estudo dos tipos de órbitas relacionadas com o conceito em estudo, como as órbitas ‘Halo’, por exemplo

**VI** – Modelagem de trajetórias possíveis de um CubeSat em uma órbita inicial geoestacionária com destino à uma órbita lunar, por meio de transferências de Hohmann e Superestradas, baseado na missão Lunar IceCube.

1. **JUSTIFICATIVAS**

O estudo dos Problemas de N-Corpos e sua aplicação, principalmente do Problema Restrito dos Três Corpos e do Problema Bicircular dos Quatro Corpos, rende às agências espaciais, empresas e universidades a realização de missões com menor custo energético e, consequentemente, menores gastos financeiros. A utilização dos conceitos relativos às Superestradas Interplanetárias e às variedades invariantes, geradas por cada Ponto de Lagrange, amplia o leque de possibilidades para as trajetórias das missões.

O surgimento dos CubeSats – satélites miniaturizados medidos em ‘Us’ (unidades, 1U = 10 x 10 x 10 cm) – tornou viável a participação de uma comunidade científica mais vasta e menos centralizada em nações desenvolvidas. Países com um orçamento reduzido dedicado ao setor aeroespacial conseguiram contribuir de uma forma mais significativa e inovadora nas ciências espaciais por meio do desenvolvimento de CubeSats, já que um CubeSat pode ser desenvolvido completamente em um período inferior a 18 meses e custar menos de cem mil dólares. Exemplos são: África do Sul, Paquistão, Canadá e Polônia. [8]

As tecnologias empregadas nos CubeSats são constantemente incrementadas, possibilitando a existência dos “CubeSats Interplanetários”. Esse termo refere-se aos pequenos satélites com capacidade de atingir distâncias além da órbita terrestre sem danificar seus componentes eletrônicos internos pelas radiações existentes no Sistema Solar. Por serem desenvolvidos com uma arquitetura aberta que possibilita a “conteinerização”, tecnologias como propulsores iônicos e sensores de alta capacidade podem ser acopladas em um CubeSat [9], o que permite o estudo aprofundado da Lua, por exemplo, como o Lunar IceCube está projetado para fazer. [10]

Aliada aos CubeSats está a aplicação do conceito das Superestradas Interplanetárias. As trajetórias geradas pelos Pontos de Lagrange dos sistemas de três corpos possibilitam o transporte dos CubeSats sem a necessidade de propulsores mais robustos e grande quantidade de espaço no satélite dedicada aos combustíveis. Com pequenas correções possibilitadas por um pequeno propulsor iônico, por exemplo, é possível seguir as trajetórias denominadas de variedades invariantes de forma natural, viabilizando a transferência entre trajetórias por todo o Sistema Solar. [9][10]

Como o sistema Terra-Lua está permeado por variedades invariantes geradas pelos pontos de libração, lançar um CubeSat e aproveitar-se dessas trajetórias para chegar até a Lua é uma tendência de diversas missões atuais. É importante que o Brasil também desenvolva e faça uso desse conhecimento, a fim de atender às necessidades de crescimento da indústria aeroespacial brasileira e do fomento à pesquisa nas instituições de pesquisa aeroespacial, incluindo as universidades públicas. O investimento na pesquisa e produção de CubeSats já é prioridade governamental – como estabelecido pelo Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE) - e o retorno desse investimento impulsiona o desenvolvimento de setores diversos, como a indústria, inovação, educação, civil e militar.

Este projeto tem como objetivo o auxílio na comunidade científica para a maior compreensão do tema e domínio do conteúdo para a contribuição no desenvolvimento de novos “CubeSats Interplanetários” brasileiros, utilizando-se dos conceitos das Superestradas Interplanetárias.

**5. METODOLOGIA**

Para a realização deste projeto, o discente utilizará materiais acadêmicos, como livros, artigos científicos de revistas, relatórios e apresentações de pesquisadores, principalmente da NASA, JPL e da Revista Brasileira de Ensino de Física - vários estudos neste setor, como estudos sobre a influência do Problema Restrito dos Três Corpos na movimentação dos astros do Sistema Solar [4], e estudos dedicados à Mecânica Celeste e o Problema Circular Restrito dos Três Corpos [11] - disponíveis na biblioteca da UFABC e na internet.

O contato com professores e pesquisadores da área da Engenharia Aeroespacial da UFABC está previsto.

A realização deste projeto abrange 6 (seis) fases:

1. A fase I está relacionada ao objetivo específico I, e sua realização se dará por meio do estudo de artigos científicos, como o artigo introdutório de Martin W. Lo sobre as variedades invariantes e as Superestradas Interplanetárias [2] e o artigo sobre a relação das Superestradas e o programa Origins, da NASA [3]; de livros acadêmicos e relatórios. Um capítulo dos relatórios parcial e final reunindo todo o conhecimento adquirido sobre os conceitos mais aprofundados das Superestradas Interplanetárias, suas trajetórias e uso para a navegação será redigido para concluir esta fase.
2. A fase II está relacionada ao objetivo específico II, e sua realização se dará por meio do estudo de artigos científicos, como “Aplicação do Problema Restrito de Três Corpos no estudo do movimento de astros do sistema solar”, (MACEDO; et al. 2018) [4]; de livros acadêmicos e relatórios. Um capítulo dos relatórios parcial e final reunindo todo o conhecimento adquirido sobre o Problema Restrito dos Três Corpos e sua relação com as variedades invariantes, pontos de libração e com as Superestradas Interplanetárias será redigido.
3. A fase III está relacionada ao objetivo específico III, e sua realização se dará por meio do estudo de artigos científicos, como “Dynamical Systems, the Three-Body Problem and Space Mission Design” (LO; et al. 2000) [5]; livros acadêmicos e relatórios. Um capítulo dos relatórios parcial e final reunindo todo o conhecimento adquirido sobre as variedades invariantes – como elas são formadas, suas relações com os Pontos de Lagrange e com sistemas de três e quatro corpos – e dos mapas de Poincaré dos Pontos Colineares do sistema Terra-Lua será redigido.
4. A fase IV está relacionada ao objetivo específico IV, e sua realização se dará por meio do estudo de artigos científicos, como “Lunar Sample Return via the Interplanetary Superhighway” (LO; et al. 2002) [12] livros acadêmicos e relatórios. Um capítulo dos relatórios parcial e final reunindo todo o conhecimento adquirido sobre uma possível estação espacial Lunar, bem como dos pontos L1 e L2 do sistema Terra-Lua e como eles se relacionam com a exploração do Sistema Solar Exterior será redigido.
5. A fase V está relacionada ao objetivo específico V, e sua realização se dará por meio do estudo de artigos científicos, como “Transferências Orbitais Envolvendo Órbitas Do Tipo Halo” (FELIPE. 2005) [13]; livros acadêmicos e relatórios. Um capítulo dos relatórios parcial e final reunindo todo o conhecimento adquirido sobre as órbitas possíveis de serem geradas em volta dos pontos de libração, bem como suas relações com as variedades invariantes e Superestradas Interplanetária e alguns tipos de transferências que um V/E pode realizar será redigido.
6. A fase VI está relacionada ao objetivo específico VI, e sua realização se dará a partir de modelagens computacionais de algumas trajetórias possíveis de um CubeSat geoestacionário chegar à órbita Lunar, por meio de transferências de Hohmann e Superestradas. As simulações serão feitas pelo software General Mission Analysis Tool, da NASA, em conjunto com o MATLAB.
7. A fase VII consiste na integração de todo o conteúdo pesquisado, resultados e conclusões, reunidos na redação do relatório final.

**6. CRONOGRAMA DA PESQUISA**

**Duração:** O projeto tem duração total prevista de 12 (doze) meses.

A primeira, segunda, terceira, quarta e quinta fase terão duração de 2 (dois) meses cada. A sexta fase terá duração de 3 (três) meses e 15 (quinze) dias. A sétima fase terá duração de 3 (três) meses.

Gráfico, Gráfico de cascata

Descrição gerada automaticamenteO início da fase I ocorrerá em 01 de setembro de 2022, com o cronograma posto em prática a partir deste momento.

**7. EXEQUIBILIDADE**

Para boa execução da pesquisa proposta, de acordo com o cronograma desta, os seguintes recursos são necessários:

**HUMANOS:** O aluno e o orientador serão os principais recursos humanos, podendo haver a possibilidade de contato com outros professores da UFABC ou de outras instituições de renome (podemos citar o GDOP - Grupo de Dinâmica Orbital e Planetologia, da Faculdade de Engenharia da UNESP, em Guaratinguetá/SP, um dos mais importantes do Brasil nesta área), para discussões adicionais sobre o tema.

**MATERIAIS:**

**- Internos:** Biblioteca da UFABC (disponível via internet e presencialmente), computador com internet (disponível), software GMAT (“open source”, disponível gratuitamente na internet).

**- Externos:** Acervos de livros, artigos e jornais científicos de institutos e instituições de pesquisas aeroespaciais (disponível via internet a partir da UFABC e convênios/periódicos CAPES).

Em face da disponibilidade de tudo o que é necessário para a realização e bom andamento desta pesquisa, acredito que o projeto poderá ser cumprido satisfatoriamente.

**8. PRESTAÇÃO DE RELATÓRIOS**

Dois relatórios: um parcial e um final. Serão enviados conforme o cronograma presente no edital.

**9. REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA BÁSICA**

[1] LO, Martin W. **The Interplanetary Superhighway for the Development of the Moon & the Earth's Neighborhood**. In: THE AMERICAN ASTRONAUTICAL SOCIETY SPACE FLIGHT MECHANICS CONFERENCE, 2019, Portland. Anais. Portland: National Aeronautics and Space Administration, 2019. p. 1-52.

[2] LO, Martin W. **Invariant manifolds and the interplanetary superhighway**. In: SIXTH INTERNATIONAL CONGRESS ON INDUSTRIAL APPLIED MATHEMATICS, 7, 2007, Zurique. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics. Pasadena: Wiley, 2008. p. 1030907-1030908. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pamm.200700573. Acesso em: 17 jun. 2021.

[3] LO, Martin W. **The InterPlanetary Superhighway and the Origins Program**. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2002, Big Sky. Anais. Pasadena: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002. p. 1-20. doi: 10.1109/AERO.2002.1035332.

[4] MACEDO, Gabriel da Silva; JUNIOR, Artur Justiniano Roberto. **Aplicação do Problema Restrito de Três Corpos no estudo do movimento de astros do sistema solar.** Revista Brasileira de Ensino de Física, Alfenas - Minas Gerais, Brasil, v. 40, ed. 4, 25 maio 2018. DOI http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-008. Disponível em: http://www.scielo.br/rbef. Acesso em: 26 maio 2022.

[5] LO, Martin W; et al. INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIFFERENTIAL EQUATIONS, 1999, Berlin. **Dynamical Systems, the Three-Body Problem and Space Mission Design** [...]. Pasadena, California, EUA: World Scientific, 2000. 15 p.

[6] FIGUERÊDO, Elysandra; CASTRO, Antônio S. de. **Um Problema de Três Corpos Analiticamente Solúvel**. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, Brasil, v. 23, ed. 3, p. 289-293, setembro 2001.

[7] FORTES, Elaine Cristina Ferreira Silva; AZEVEDO, Franciane; KOLLAND, Marcos. **Desvendando o Endereço Físico do Telescópio James Webb**. Revista Brasileira de Ensino de Física, [*s. l.*], v. 40, ed. 3, 28 nov. 2017.

[8] VILLELA, Thyrso; BRANDÃO, Alessandra; LEONARDI, Rodrigo. **Cubesats e oportunidades para o setor espacial brasileiro**. Contribuições do CGEE ao SNCTI, Brasília, Distrito Federal, Brasil v. 21, ed. 42, p. 91-114, Jan/Jun 2016. Disponível em: http://seer.cgee.org.br. Acesso em: 25 maio 2022.

[9] STAEHLE, Robert L.; ANDERSON, Brian; BETTS, Bruce; et al. **Interplanetary CubeSats:** opening the solar system to a broad community at lower cost. 1. ed. Vol. 2. Journal of Small Satellites, 2012. Disponível em: https://jossonline.com/Papers1441.html. Acesso em: 17 jun. 2021.

[10] CLARK, Pamela; et al. **Challenges and Solutions for Lunar Ice Cube BIRCHES and Other First Generation CubeSat Lunar Orbital Science Payloads.** In: SMALL SATELLITE CONFERENCE, 32, 2018, Logan. Proceedings. Pasadena: 2018.

[11] MARTINS, Flavio Avila Correia; ZANOTELLO, Marcelo. **Mecânica celeste e a teoria dos sistemas dinâmicos: uma revisão do problema circular restrito de três corpos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, Santo André, São Paulo, Brasil, v. 40, ed. 2, 2 out. 2017.

[12] LO, Martin W; CHUNG, Min-Kun J. **Lunar Sample Return via the Interplanetary Superhighway**. In: AIAA/AAS ASTRODYNAMICS SPECIALIST CONFERENCE AND EXHIBIT, 2002, Monterrey. Anais. Pasadena: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002. p. 1-7.

[13] FELIPE, Gislaine de. **TRANSFERÊNCIAS ORBITAIS ENVOLVENDO ÓRBITAS DO TIPO HALO**. Orientador: Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado. 2005. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, [*S. l.*], 2005. p. 222.

[14] CURTIS, Howard D. **Orbital Mechanics for Engineering Students.** 2. ed. Oxônia: Butterworth-Heinemann, 2010.

[15] HOWELL, Kathleen Connor. **THREE DIMENSIONAL, PERIODIC, "HALO" ORBITS**. 8 jul. 1983.

[16] FITZPATRICK, Richard. **An Introduction to Celestial Mechanics.** Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

1. Link para informações sobre o GMAT e download do programa: https://software.nasa.gov/software/GSC-17177-1 [↑](#footnote-ref-1)