



Controle vetorizado de empuxo baseado em dispositivos flexíveis para sistemas propulsivos

Aluno: Diogo Nobre de Araújo Cintra

Orientador: Fábio Bobrow

São Paulo - São Paulo

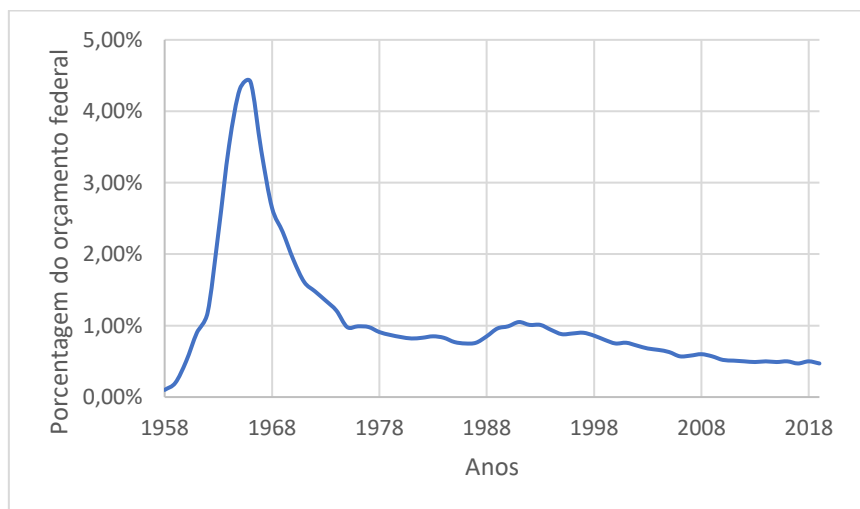
Maio/2021

1. Motivação

Durante a guerra fria, os Estados Unidos e a antiga União Soviética entraram em uma competição tecnológica pela conquista da órbita terrestre, que mais tarde ficou conhecida como “corrida espacial”.

Em 1958, a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) foi fundada como uma resposta aos grandes avanços aeroespaciais da URSS, com um orçamento anual de cerca de 0,1% do orçamento federal. Após contínuas vitórias aeroespaciais da URSS (primeiro satélite em 1957, primeiro homem em órbita em 1961 e primeira “caminhada espacial” em 1965), o então presidente americano, John F. Kennedy, fez um icônico discurso (“o homem vai pousar na lua e no final da década de 60”) e aumentou o orçamento da NASA para mais de 4%, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1: Orçamento anual destinado a NASA



Fonte 1: U.S. Office of Management and Budget e Air Force Association

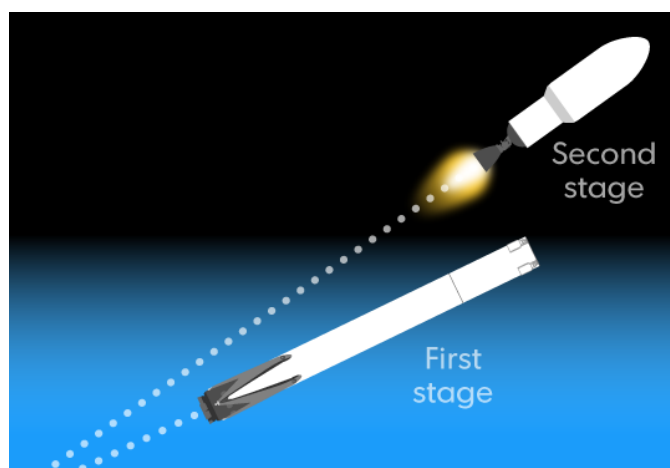
Isso possibilitou incríveis avanços no setor aeroespacial americano, sendo o mais notável a chegada do homem à Lua em 1969 durante as missões Apollo. No entanto, após esse feito, o orçamento da NASA despencou e se estagnou abaixo de 1%. Tal situação ocorreu devido aos elevados custos de lançamento e baixo retorno.

A NASA até chegou a desenvolver uma aeronave espacial reutilizável para reduzir os custos, o *Space Shuttle*, o qual teve um papel importantíssimo na exploração espacial, como, por exemplo, a construção da ISS (*International Space Station*) e o lançamento do telescópio espacial Hubble. No entanto, como apenas o 2º estágio (aeronave que navega no espaço) era reutilizável, cada lançamento custava em média US\$ 450 milhões^[4]. Todo o programa do

Space Shuttle custou aproximadamente US\$ 209 bilhões^[5], o que fez com que a NASA encerrasse as atividades dessa aeronave depois de apenas 30 anos.

Após o *Space Shuttle*, nenhum outro foguete ou aeronave espacial reutilizável ganhou espaço no orçamento da NASA. Foi apenas em 2015 que a empresa privada norte-americana SpaceX desenvolveu e provou sua tecnologia de foguetes com o 1º estágio (tanque de combustível que tira a aeronave da órbita terrestre) reutilizável, o que até então era considerado impossível por muitos engenheiros e cientistas. Na Figura 2, pode-se observar o que normalmente é o primeiro e o segundo estágio em um foguete.

Figura 2: Separação dos estágios no Falcon 9

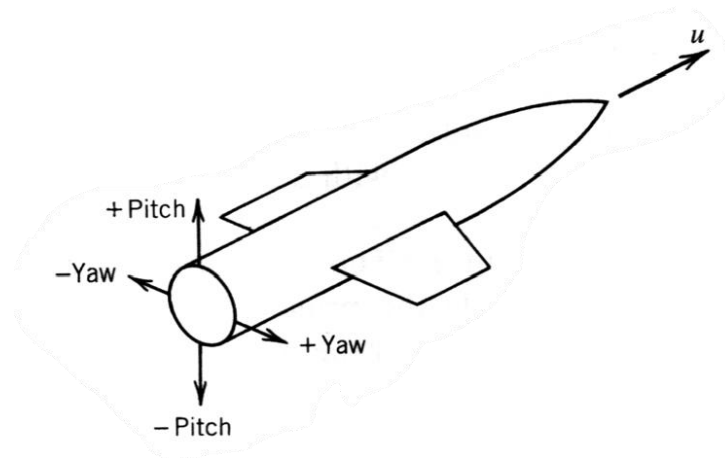


Fonte 2: Frank Pompa, Ramon Padilla, Mitchell Thorson USA TODAY^[7]

Tornar um foguete reutilizável implica em recuperá-lo com segurança e completamente funcional após o lançamento. Diferentemente do 2º estágio (aeronave), que pode ser projetado para aterrissar em uma pista como um avião, o 1º estágio (tanque de combustível), por ter formato cilíndrico, precisa aterrissar da mesma forma que decolou: na vertical. Para cumprir esse requisito, os engenheiros da SpaceX desenvolveram com sucesso todo um sistema de controle de atitude (orientação) e posição do foguete específico para a aterrissagem. Tal feito permitiu que o custo médio de lançamento do Falcon 9 fosse de apenas US\$ 62 milhões^[6].

O sistema de controle de atitude um foguete pode ser baseado em diversos atuadores, sendo o mais utilizado o controle vetorizado de empuxo (TVC – *Thrust Vector Control*). Ele consiste em manipular a direção do empuxo dos motores para ajustar a atitude e velocidade angular do veículo controlando os momentos de *pitch* e *yaw*, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3: Momentos que o TVC pode controlar



Fonte 3: Adaptada de Sutton, George Paul^[8]

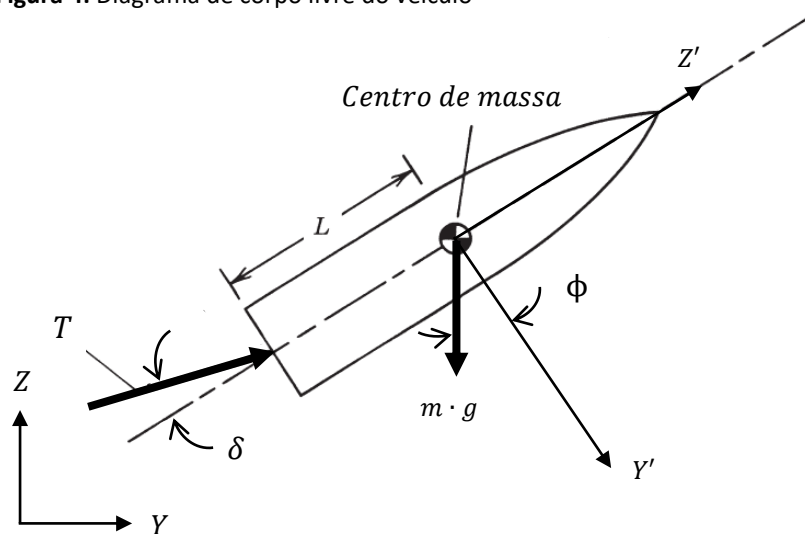
O TVC já é usado há décadas no lançamento de foguetes, mas foi apenas recentemente que ele começou a ser utilizado também na aterrissagem dos mesmos.

2. Objetivo

O objetivo desse trabalho é projetar e implementar o sistema de controle TVC em um veículo de testes. Por se tratar de um tema de elevada complexidade, o projeto será dividido em duas partes: (a) controle de atitude e (b) controle de posição. A ideia é iniciar com o primeiro e, caso corra tudo bem, fazer também o segundo (que seria um “extra” no trabalho).

A Figura 4 ilustra uma versão simplificada (2D) desse sistema, onde T é a força de empuxo, δ é o ângulo de empuxo, ϕ é a orientação do veículo e Y e Z são a posição do veículo.

Figura 4: Diagrama de corpo livre do veículo

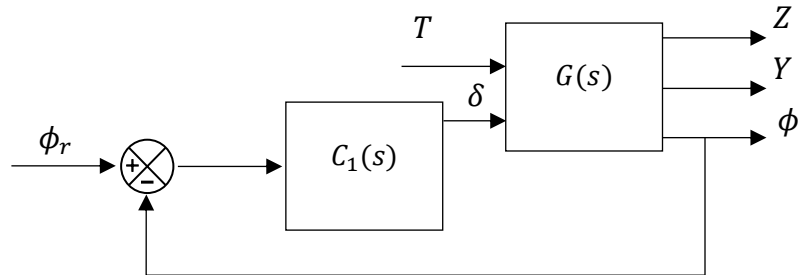


Fonte 4: Adaptada de Sutton, George Paul^[8]

a. Controle de atitude

O controle de atitude ($C_1(s)$) consiste em controlar a ângulo de empuxo (δ) de modo que a orientação do veículo (ϕ) siga uma orientação de referência (ϕ_r).

Figura 5: Idealização da malha de controle de atitude



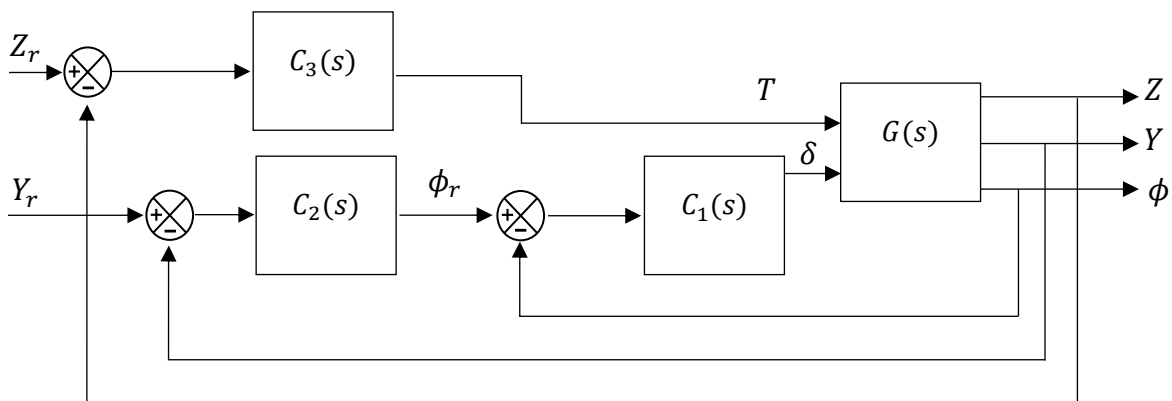
Fonte 5: Elaborada pelo autor

Para implementar esse sistema de controle, será necessário construir um veículo de testes que possua sensores de orientação, bem como um *gimbal* para ajustar o ângulo de empuxo. Essa construção mecânica faz parte do escopo do projeto.

b. Controle de posição

O controle de posição horizontal ($C_2(s)$) consiste em controlar a orientação de referência (ϕ_r) de modo que a posição horizontal do veículo (y) siga uma posição de referência (y_r). Já o controle de posição vertical ($C_3(s)$) consiste em controlar a força de empuxo (T) de modo que a posição vertical do veículo (z) siga uma posição de referência (z_r).

Figura 6: Idealização da malha de controle de posição



Fonte 6: Elaborado pelo autor

Para implementar esse sistema de controle, será necessário incorporar no veículo de testes anterior sensores de posição, bem como um propulsor para gerar empuxo no veículo. Essa construção mecânica não faz parte do escopo do projeto, mas será um “extra” almejável.

3. Materiais e métodos

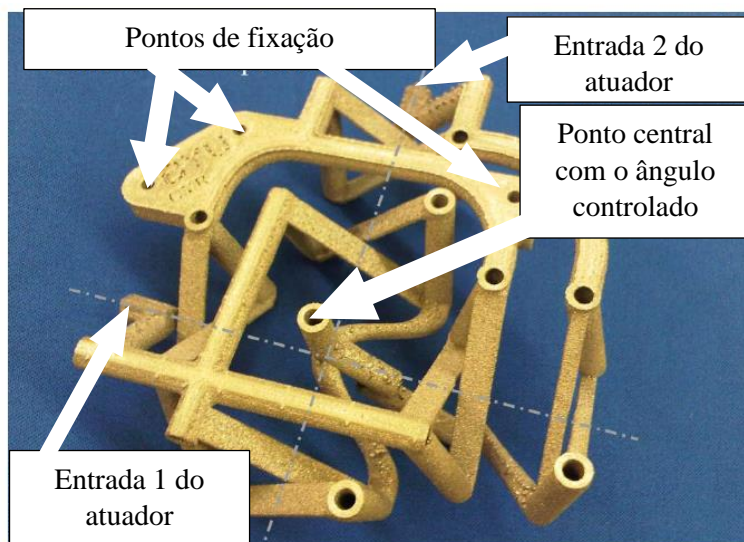
Para poder desenvolver o controle de atitude (a) e o controle de posição (b), os softwares que *a priori* serão utilizados são:

1. MATLAB – Simulink
 - Para poder construir e simular as malhas de controles;
2. NX (Siemens)
 - Desenvolvimento do CAD/CAM/FEM das peças que vão compor as partes do projeto;
3. Mbed online ou Keil
 - Compilador para o microcontrolador;
4. CURA
 - Otimizar parâmetros de impressão 3D para peças que vão compor as partes do projeto;

a. Controle de atitude

Para poder controlar o ângulo δ descrito na Figura 4, o projeto irá partir do mecanismo desenvolvido pela *Brigham Young University* e pelo *Marshall Space Flight Center NASA* ^[1], o qual está representado na Figura 7.

Figura 7: Conversor mecânico angular



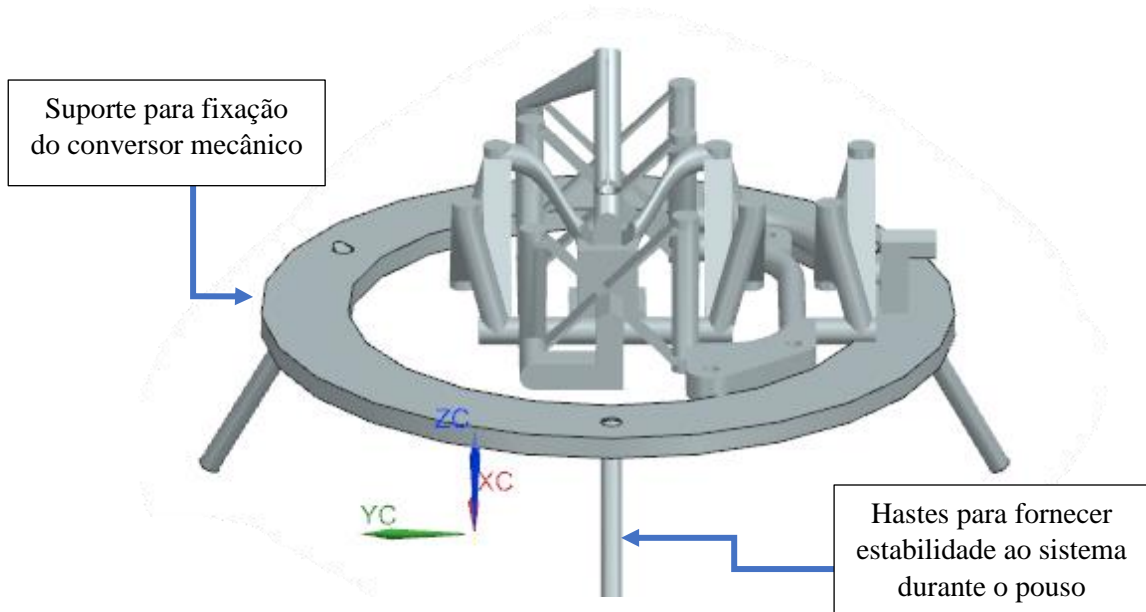
Fonte 7: "Monolithic 2 DOF fully compliant space pointing mechanism"

É importante salientar que, embora a versão final deste dispositivo tenha sido feita em titânio, o presente trabalho irá explorar outros materiais para este mecanismo, como,

por exemplo, um compósito de fibra de carbono e PET-G, o qual pode facilmente ser utilizado em impressoras 3D.

Para que os teste da malha de controle na Figura 5 possam ocorrer, será desenvolvido o dispositivo de testes na Figura 8.

Figura 8: Dispositivo de teste com conversor mecânico angular





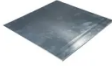


Fonte 8: Elaborado pelo autor

Como foi ilustra a Figura 5, a malha de controle será fechada e seu *feedback* será realizado através de uma IMU (Inertial Measurement Unit), a qual retornará o valor ϕ a todo instante.

A técnica de controle que será inicialmente abortada será o controle PID, devido a sua vasta usabilidade na indústria e disponibilidade de bibliografia, como o os artigos “*A control system for a 3-axis camera stabilizer*”^[2] e “*A Robust Double Active Control System Design for Disturbance Suppression of a Two-Axis Gimbal System*”^[3].

A priori, os materiais utilizados para poder implementar o controle do dispositivo mecânico 1, estão listados na Tabela 1.

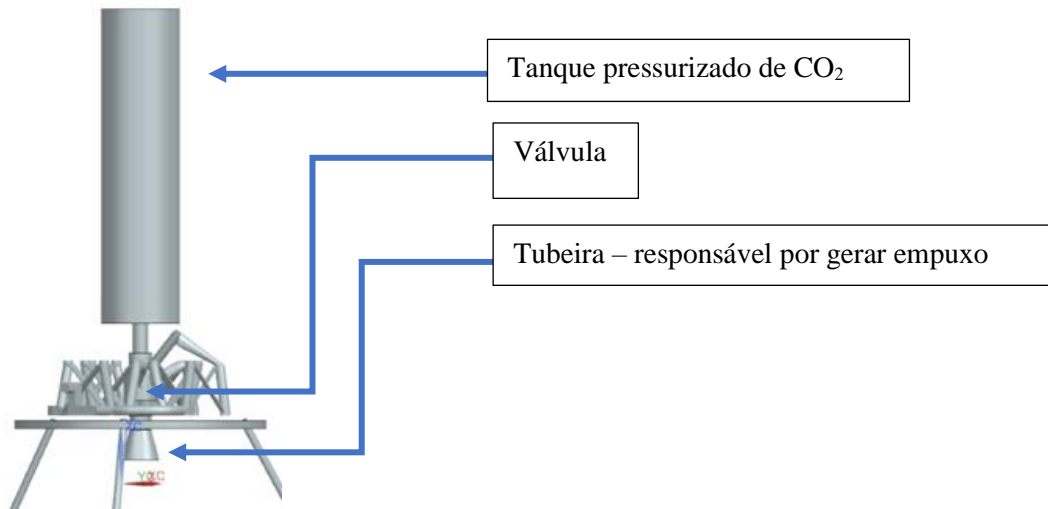
Tabela 1: Custos envolvidos na parte a do projeto

Material	Propósito	Ilustração	Quantidade	Valor
IMU	Medição da aceleração, ângulo e velocidade angular		1	R\$ 120,00
Haste de alumínio	Estabilidade no pouso		2	R\$ 25,00
Chapa de alumínio	Suporte estrutural para outros mecanismos		1	R\$ 20,00
Servo motor	Imprime o ângulo δ no dispositivo da Figura 7		2	R\$ 60,00
Placa de desenvolvimento	Microcontrolador, onde as malhas serão programadas		1	R\$ 70,00
Total				R\$ 380,00

b. Controle de posição

Uma vez que o controle de atitude for validado, o dispositivo de teste receberá uma atualização, a qual tem por objetivo implementar um sistema de empuxo, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9: Partes da atualização do dispositivo de testes



Fonte 9: Elaborado pelo autor

Para poder controlar a intensidade do empuxo T , deverá ser utilizada uma válvula que controla a vazão mássica na tubeira. Além disso, para que o dispositivo de teste possa se localizar em relação ao solo, as posições absolutas Y e Z devem ser monitoradas para fechar a malha de $C_2(s)$ e $C_3(s)$. Tal *feedback* será realizado por um GPS.

Por fim, para poder mapear e prever futuras necessidades de investimento, a Tabela 2 foi desenvolvida:

Tabela 2: Custos envolvidos na parte b do projeto

Material	Propósito	Ilustração	Quantidade	Valor
Tanque de CO2	Propelente do sistema propulsivo		1	R\$ 105,00
Válvula	Regular a vazão mássica na tubeira		1	R\$ 70,00
Tarugo de alumínio	Fabricação da tubeira		1	R\$ 30,00
GPS	Complemento do sistema de posição		1	R\$ 130,00
Total				R\$ 380,00

4. Cronograma

Atividade	Mês											
	1 (ago)	2 (set)	3 (out)	4 (nov)	5 (dez)	6 (jan)	7 (fev)	8 (mar)	9 (abr)	10 (maio)	11 (jun)	12 (jul)
Pesquisas e benchmarks	■											
Fundamentação teórica	■	■										
Modelagem matemática		■	■									
Fabricação do dispositivo de testes e desenvolvimento da malha de controle de atitude	■	■	■	■								
Implementação da malha de controle de atitude				■	■							
Testes e aprimoramento					■	■						
Fabricação (Sistema propulsivo)						■	■					
Controle da válvula							■					
Malha de controle de posição						■	■	■				
Montagem do sistema								■	■	■		
Testes estáticos										■		
Testes dinâmicos										■	■	
Validação do protótipo										■	■	■

5. Referências

- [1] Merriam, E. G., Jones, J. E., Magleby, S. P., and Howell, L. L.: Monolithic 2 DOF fully compliant space pointing mechanism, *Mech. Sci.*, 4, 381–390, <https://doi.org/10.5194/ms-4-381-2013>, 2013.
- [2] Hasnain, A. B., Algoz, A A control system for a 3-axis camera stabilizer. 2018. <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1231195/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2021.
- [3] Dran, D. Q., Chakir, S., Kim, Y B A Robust Double Active Control System Design for Disturbance Suppression of a Two-Axis Gimbal System. 2020. <https://www.researchgate.net/publication/346103404>. Acesso em: 1 abr. 2021.
- [4] NASA, Kennedy Space Center. How much does it cost to launch a Space Shuttle? https://www.nasa.gov/centers/kennedy/about/information/shuttle_faq.html#10. Acesso em: 15/04/2021.
- [5] MALIK, Tariq. NASA's Space Shuttle by the Numbers: 30 Years of a Spaceflight Icon. 2011. <https://www.scientificamerican.com/article/nasas-space-shuttle-numbers/>. Acesso em: 29/04/2021
- [6] SPACEX, media: Capabilities and Services; Falcon 9 and Falcon Heavy launch services <https://www.spacex.com/media/Capabilities&Services.pdf>. Acesso em: 10/05/2021.
- [7] POMPA, Frank.; PADILLA, Ramon.; THORSON, Mitchell. Anatomy of a SpaceX launch. 2017. <https://www.usatoday.com/pages/interactives/spacex-launch-graphic/>. Acesso em: 20/05/2021.
- [8] Rocket propulsion elements / George P. Sutton, Oscar Biblarz. — 8th ed.