



O Estado da Arte dos Sistemas de Controle de Reentrada na Atmosfera para Veículos Aeroespaciais Reutilizáveis

Thays Cristina Da Silva Alves ¹, Fernando Cortez Sica ²

¹ Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil
Departamento de Engenharia de Controle e Automação.

² Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil
Departamento de Computação.

thays.alves@aluno.ufop.edu.br

Resumo. Um veículo aeroespacial tem suas peças separadas e descartáveis durante as etapas do voo, essas peças podem cair no mar ou ficar na órbita da Terra. Para evitar o lixo espacial e para reutilizar as peças, estão sendo desenvolvidos veículos de lançamento reutilizável (VLR). Logo, o objetivo desse artigo é fazer um levantamento sobre os veículos aeroespaciais reutilizáveis e os tipos de controle de atitude que estão sendo desenvolvidos entre o período de 2015 e 2021. Como resultado, foi possível concluir que após o lançamento da Falcon 9 e New Shepard, o controle de atitude pode ser considerada uma área promissora para futuras pesquisas causando um aumento nas publicações em controle de atitude na etapa de reentrada.

Palavras-chave: Controle de Atitude; Veículos Reutilizáveis; Etapa de Reentrada.

1. Introdução

Um foguete é um veículo aeroespacial utilizado para levar satélites, sondas ou tripulantes para o espaço. Durante as etapas/estágios do voo, algumas partes do veículo aeroespacial são separadas do veículo e descartáveis para diminuir a sua carga e manter a aceleração mesmo com a redução do empuxo. Como algumas partes do foguete são descartáveis, só uma pequena fração da massa levada para o espaço é considerada carga ativa. De acordo com Carvalho, Lima e Gonçalves (2021), no período entre 1958 e 2020, houve mais de 5.980 lançamentos que geraram em torno de 25.297 objetos rastreados na órbita da Terra, ou seja, existe mais lixo espacial do que satélites operacionais.

Um veículo de lançamento reutilizável (VLR) é um veículo aeroespacial que pode ter suas peças reutilizadas após o seu lançamento, evitando, assim, o lixo espacial. Esse tipo de foguete está sendo desenvolvido por empresas espaciais com o objetivo de gerar menos lixo espacial e reutilizar peças. A reutilização de peças, proporciona, também, a redução de custos das viagens e missões espaciais. As etapas de reentrada na atmosfera, para a posterior recuperação das peças, são gerenciadas por sistemas de controle de atitude.

O controle de atitude em veículos aeroespaciais tem como objetivo principal minimizar as perturbações de fora do veículo para que ele consiga manter a sua estabilidade (SAMPAIO, 2006). Logo, é preciso estudar e analisar qual tipo de controlador adequa-se mais para cada tipo de



projeto. A sua importância é que, com a corrida espacial para a próxima missão que levará humanos à Lua, algumas empresas de veículos aeroespaciais, como a SpaceX e a Blue Origin, estão desenvolvendo foguetes parcialmente ou totalmente reutilizáveis através de sistemas de controle de atitude.

O objetivo deste artigo consiste em fazer um levantamento para analisar como está a pesquisa sobre os tipos de sistema de controle de atitude de um foguete na etapa de reentrada na atmosfera no período de 2015 até 2021. Para tanto, inicialmente é realizada a caracterização da atitude de um foguete para que, na seção 2, seja abordado o assunto da reentrada de um veículo espacial na atmosfera. Por sua vez, a seção 4 ilustra alguns modelos de veículos reutilizáveis e, a seção 5 relata alguns projetos de controle de atitude para a reentrada, na atmosfera, de veículos reutilizáveis. Por fim, a seção 6 é destinada às conclusões e trabalhos futuros.

2. Atitude de um foguete

A atitude de um foguete é dada pela orientação de rotação em torno do centro de massa do veículo através dos ângulos *Pitch* (arfagem), considerado o mais importante para calcular a trajetória de voo pela sua movimentação em torno do eixo horizontal, *Yaw* (guinada) e o *Roll* (rolagem). A figura a seguir mostra as incidências dos ângulos Pitch, Yaw e Roll em relação à fuselagem da aeronave.

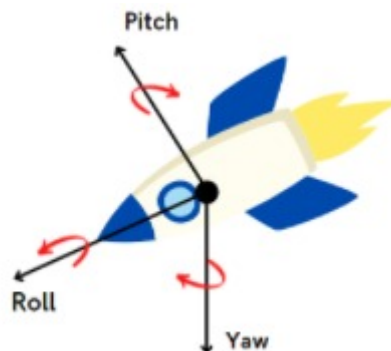


Figura 1. Ângulos Pitch, Yaw e Roll. Fonte: Autoria Própria (2021)

Pode-se observar, pela figura acima, que os ângulos Pitch e Yaw podem ser idênticos por causa da simetria geométrica. Desta forma, pode-se utilizar o mesmo controle para ambos, porém, é importante salientar que o controle para o ângulo Roll precisa ser notadamente diferente (PORTO, 2017).

3. Reentrada de um veículo aeroespacial

A reentrada de um veículo na atmosfera é considerada crítica pela sua complexidade, isto porque os fenômenos físicos envolvente nessa etapa são diferentes do que é habituado a utilizar na superfície terrestre (AFEITOS, 2014). Todo veículo aeroespacial tem um referencial de coordenadas de reentrada, onde os vetores X, Z, V representam, respectivamente, o plano horizontal, vertical e o de velocidade. A Figura 2 ilustra o referencial de coordenadas de reentrada. O ângulo formado na reentrada é dado por γ que denota o valor angular entre o plano horizontal e o vetor de velocidade. O controle do valor do ângulo γ em a sua importância para que a aeronave não se desintegre assim que atinja a atmosfera. Desta forma, o ângulo γ representa um dos fatores mais importantes no processo da reentrada. Durante o momento de reentrada, existem outras forças que são exercidas sobre o veículo tais como a força da gravidade, o arrasto e a sustentação.

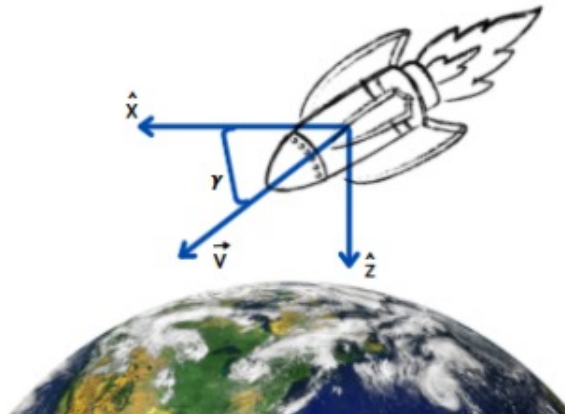


Figura 2. Referencial de Coordenadas de Reentrada. Fonte: Autoria Própria (2021)

É preciso ter conhecimento sobre os seus princípios fundamentais e as etapas da reentrada para conseguir fazer um controle de atitude. Os princípios fundamentais se baseiam na desaceleração, o aquecimento e o impacto que ocorre na parte externa do veículo. A etapa de desaceleração é a mais importante porque se a velocidade for rápida, o veículo não irá atingir a superfície terrestre e terá, como consequência, a volta para o espaço. Porém, se a velocidade da reentrada for muito baixa, o veículo pode se chocar com a superfície terrestre. Já o aquecimento do veículo ocorre por causa da fricção de sua superfície com a atmosfera. Por mais que a parte externa do veículo aeroespacial seja desenvolvida para aguentar temperaturas extremas, é preciso ter um controle dessa temperatura para não afetar negativamente os possíveis tripulantes e os circuitos eletrônicos da aeronave. Por fim, o impacto que ocorre na superfície terrestre, também conhecido como aterragem, é o momento de pouso do veículo em um determinado lugar (AFEITOS, 2014).

Os tipos de reentradas podem ser classificados como (PREADO; ALMEIDA, 2007):

- **Reentrada balística:** o veículo irá cair quando entrar na atmosfera. É preciso ter um controle da posição do eixo central do veículo (eixo da velocidade), pois se o veículo tende muito para um dos lados, terá consequências por causa da resistência do ar;
- **Reentrada de voo planado (*glide*):** é preciso um controle para se ter um equilíbrio entre as forças de sustentação e gravitacional, enquanto a força de arrasto tem como objetivo diminuir a velocidade no período que a atmosfera não é densa até que a força gravitacional seja maior que a força de sustentação;
- **Reentrada de voo salto (*skip*):** o foguete dá “saltos”, ou seja, irá subir e depois descer durante a trajetória na intenção de alterar a intensidade em altitudes mais altas provocando assim uma desaceleração do veículo de forma menos brusca, resultando em um tipo de reentrada mais adequada para missões com tripulantes.

4. Modelos de Veículos de Lançamento Reutilizável

O primeiro tipo de sistema reutilizável foi desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), e é conhecido como *Space Shuttle* (Ônibus Espacial). Seu lançamento era executado como o de foguete, as manobras na órbita eram executadas como uma espaçonave e o seu pouso era feito como um avião (WILSON, 2006). O Ônibus Espacial é representado Figura 3, e tinha suas peças, exceto o tanque externo, recicladas do mar.

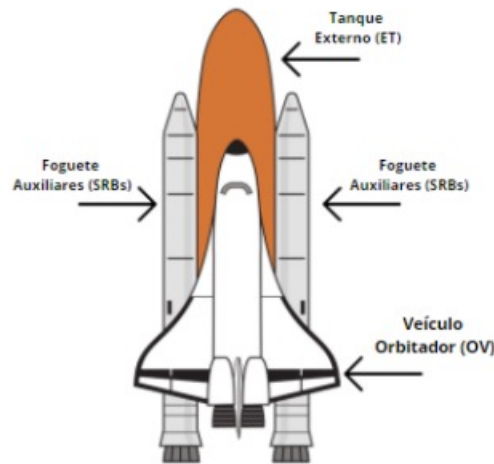


Figura 3. Modelo do Space Shuttler. Fonte: Autoria Própria (2021)

No total, a NASA desenvolveu 6 VLRs, sendo eles: *Enterprise*, *Columbia*, *Challenger*, *Discovery*, *Atlantis* e o *Endeavor*. O sistema de controle de atitude na fase de reentrada desses veículos foi feito através do piloto automático, que executou diversas voltas de rotação para diminuir a velocidade do veículo (MARS, 2021). O controle de voo desses veículos aeroespaciais era feito por quatro computadores IBM AP-101 de 32 bits, que tinham um desempenho parecido com os computadores pessoais da época (TOMAYKO, 1988). Em 12 de abril de 1981 o modelo *Columbia* se tornou o primeiro foguete reutilizável a ser lançado, ficando dois dias em órbita. Desde 2011 a NASA não desenvolve mais os ônibus espaciais, mas a tecnologia usada nos ônibus espaciais está sendo utilizada no foguete *Space Launch System*, que será utilizado para levar astronautas à Lua em 2024 pelo programa Artemis.

Em 2015 a empresa de foguetes *Space Exploration Technologies Corp*, também conhecida como SpaceX, lançou a Falcon 9 e conseguiu recuperar o propulsor do primeiro estágio do veículo através do controle de atitude dos seus propulsores, se tornando o primeiro foguete reutilizável de classe orbital do mundo. A Falcon 9 é um foguete com dois estágios, que recebe esse nome por ter 9 propulsores Merlins que queimam oxigênio líquido e querosene refinado. Na etapa de lançamento, os 9 motores Merlins levam o foguete até uma altitude de 100 Km, e após alcançar essa atitude começa a etapa *Main Engine Cutoff*, em que motores são desligados, liberando o primeiro estágio e se preparando para voltar para a Terra. O pouso é efetuado através do controle do propulsor *Booster* (SPACEX, 2021).

O lugar do pouso da Falcon 9 é determinado de acordo com a sua carga: se for leve é feita na Terra, e se for pesada o pouso é feito em uma balsa autônoma. Na Figura 4 há a representação das etapas quando o pouso é efetuado em uma balsa autônoma. As aletas são abertas a partir do *Main Engine Cutoff* seguindo a sua rota em direção à Terra, tendo pequenos ajustes com jatos dos motores de atitude. Depois é a fase de *Return Burn*, em que os três motores são ligados para diminuir a velocidade e evitar que ele seja queimado na atmosfera. Logo após, os motores são desligados e o *Booster*, que é controlado pelas aletas, continua caindo até chegar a altitude correta para que apenas um motor faça a queima na hora do pouso. Durante a reentrada o veículo fica posicionado para o mar e só tem sua posição centralizada na balsa quando o motor é ligado.

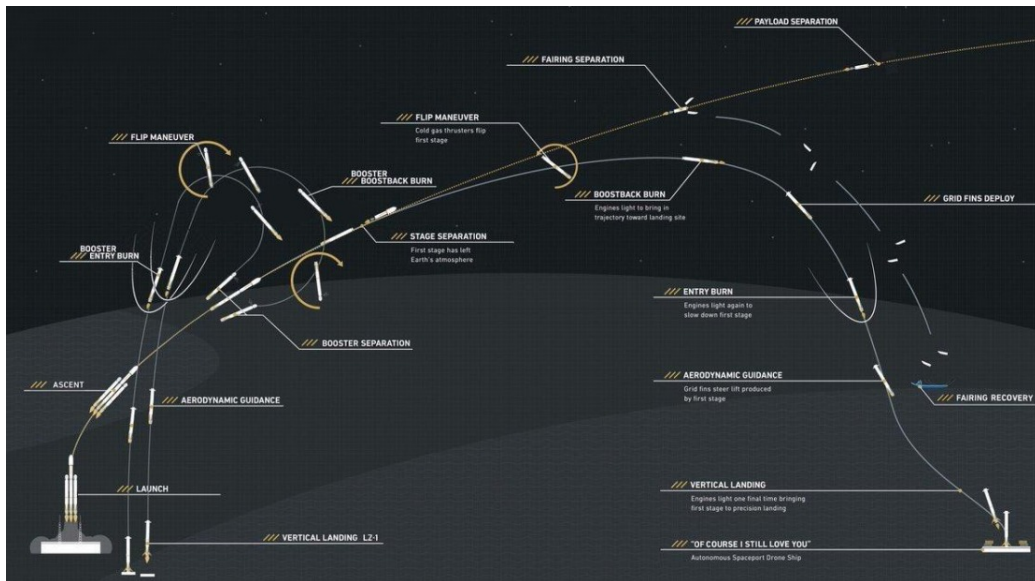


Figura 4. Etapas do pouso da Falcon 9. Fonte: SpaceX (2021)

A *New Shepard* é um modelo de foguete totalmente reutilizável criado pela Blue Origin, empresa aeroespacial. O tipo de pouso desse foguete é feito através da tecnologia de pouso e decolagem vertical (VTVL), o mesmo utilizado com a Falcon 9. O controle atitude na etapa de reentrada se encontra nos motores-foguetes principais que vão desacelerar e realizar um pouso vertical propulsivo de forma autônoma, para garantir que o veículo de lançamento reutilizável consiga receber as instruções de orientação para um pouso seguro. (AN et al., 2019).

5. Tipos de Controle Utilizados (Estado-da-Arte)

Como citado anteriormente, o uso de veículos reutilizáveis começou em 1981 através da NASA. Mas, desde 2015, com o lançamento da Falcon 9, esse tipo de foguete está ganhando mais reconhecimento pelas suas vantagens e se tornando uma promessa para o futuro do transporte espacial. Para elaborar esta pesquisa sobre o controle de atitude de um veículo espacial na etapa de reentrada, foram realizadas buscas nas bases de dados Google Acadêmico e no Portal de Periódicos da CAPES, usando o período de 2015 (desde o primeiro lançamento da Falcon 9) até 2021, sobre o projetos de sistemas de controle para pouso vertical de um foguete. Utilizou-se a relevância do artigo como critério de escolha.

No trabalho realizado por Zou et al. (2015), foi desenvolvido um controlador de atitude para que o VLR consiga rastrear o comando de orientação sob restrição de entrada, incerteza do modelo e perturbações externas. O modelo orientador foi um sistema de *feedback* estrito com incertezas, e após foi projetado um controle *backstepping* adaptativo robusto. O método *backstepping* tem como objetivo manter o ponto de equilíbrio estável e realizar segmentos de trajetórias. Apresenta, como principal vantagem, a elaboração de uma função de Lyapunov (usada para analisar a estabilidade transitória de um sistema) para os sistemas não lineares. Como resultado, a restrição de entrada foi tratada e o controle *backstepping* adaptativo robusto obteve sucesso no controle de rastreamento dos ângulos de atitude.

O objetivo do projeto desenvolvido por Mao et al. (2018) consistiu em elaborar um sistema de controle de atitude para o modelo aerosservoelástico que consiga garantir o rastreamento de comando das orientações para a etapa de reentrada. Para que isso seja possível, foi utilizado o



método de *backstepping* para desenvolver um controlador de subsistemas de dois circuitos. Para garantir o rastreamento dos comandos de orientação foi utilizado um controlador *backstepping* e, para melhorar o desempenho do rastreamento dos ângulos de atitude na etapa de reentrada, foi utilizada uma lógica *fuzzy* adaptável tipo 2. Tais técnicas podem ser usadas em situações onde muitas incertezas estão presentes para proporcionar um desempenho superior em uma série de aplicações onde é necessário, por exemplo, estimar as matrizes de função não linear. Tais estimativa garante os ajustes dos parâmetros do controlador para garantir os valores dos ângulos desejados.

Em Gao e Yao (2018), foi elaborado um sistema de controle capaz de tolerar falhas do atuador, atraso do controle, saturação de entrada, distúrbios externos na etapa da reentrada e incertezas de parâmetros do tempo. Isso foi feito através da rede *neural radial-basis function* (função de ativação de base radial) junto com o método de controle tolerante a falhas adaptativas. Este método consiste em um sistema de controle desenvolvido estrategicamente para garantir a estabilidade do sistema e uma performance aceitável mesmo a presença de falhas no sistema. A rede *neural radial-basis function*, que recebe esse nome por causa da ativação dos neurônios, denota a distância em relação a um ponto. A saída deste tipo de rede neural assemelha-se a uma parábola. O que difere esse controlador dos outros é o melhoramento da confiabilidade do sistema de atitude, isso porque ele foi projetado considerando as falhas do atuador, o atraso de controle, as incertezas do modelo dinâmico variante no tempo e os distúrbios externos.

Por sua vez, em Fialho et al. (2020) é proposto um sistema para o controle de atitude durante o pouso vertical utilizando o controlador PID, que é utilizado para compensar a dinâmica de diversos tipos de sistemas. Esse controlador tem esse nome por conta de seus três ganhos: proporcional (K_p), integral (K_i) e derivativos (K_d), que são variados para obter a resposta desejada. Logo, o objetivo do projeto foi desenvolver três controladores PID (um para cada grau de liberdade), utilizando o software *Simulink*, que faz o controle de atitude na fase de reentrada de um foguete auxiliar. Foi utilizado o foguete *Electron* da empresa *Rocket Lab*. Para o desenvolvimento do sistema, foram criados dois tipos de modelos: o modelo completo e o modelo simplificado. A diferença entre esses modelos é a força aerodinâmica que não foi considerada no modelo simplificado. Como resultado, o sistema proposto conseguiu fazer o seu pouso utilizando 81 kg de combustível a partir da queda livre vertical.

Como pode ser observado nos trabalhos descritos acima, um controlador de atitude deve considerar toda dinâmica ocasionada pelas incertezas impostas pelo meio durante as etapas de reentrada. Tais incertezas são consequências das rápidas variações de, por exemplo, densidade do ar e temperatura. Para tanto, apesar dos trabalhos utilizarem modelos distintos de controladores, todos eles convergem na ideia de interagir, em algum grau, com sistemas dinâmicos não lineares. Neste sentido, como conclusão podemos mencionar o fato de que controladores baseados em *backstepping* e *neural-basis function* são utilizados, originalmente, em sistemas dinâmicos não lineares enquanto que os controladores PID podem ser aplicados em algumas classes de problemas não lineares como o caso descrito em Fialho et al. (2020). Por fim, podemos salientar que *neural-basis function*, apesar de ser aplicada a problemas não lineares, apresenta uma saída linear - podendo proporcionar uma maior estabilidade no controle de atitude.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, foi desenvolvido um levantamento bibliográfico sobre o andamento das pesquisas sobre sistema de controle para a etapa de reentrada na atmosfera de um veículo aeroespacial desenvolvidas no período de 2015 a 2021. Através dessa pesquisa, foi possível



analisar que o controle de atitude na reentrada, por ser um assunto emergente após os lançamentos da Falcon 9 e New Shepard, representa uma área promissora e com oportunidades para desenvolvimento de outros tipos de sistema de controle, sendo eles já tradicionais ou, ainda, os baseados em sistemas conexionistas ou evolucionários. Espera-se, também, contribuir para a disseminação e consolidação do assunto tratado neste artigo a fim de incentivar o surgimento de outros projetos na área da pesquisa espacial no Brasil. Como trabalhos futuros, pretende-se, a partir do aprofundamento dos estudos, desenvolver um controlador para a etapa de reentrada na atmosfera baseado em técnicas evolucionárias de modo a antecipar a geração dos coeficientes a serem utilizados pelo controlador. Assim, espera-se uma maior eficiência e estabilidade durante o processo de reentrada e completo pouso do veículo espacial.

Referências

- AFEITOS, L. D. d. *Controlo ótimo de trajetórias explícitas de reentrada atmosférica*. Tese (Doutorado) — Universidade da Beira Interior, 2014.
- AN, B. et al. Adaptive terminal sliding mode control for reentry vehicle based on nonlinear disturbance observer. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 154502–154514, 2019.
- CARVALHO, J. P. dos S.; LIMA, J. dos S.; GONÇALVES, C. M. Poluição do ambiente espacial: O problema do lixo no espaço. *Scientia: Revista Científica Multidisciplinar*, v. 6, n. 2, p. 61–80, 2021.
- FIALHO, Y. L. et al. Sistema de controle para pouso vertical autônomo de foguetes auxiliares. Joinville, SC, 2020.
- GAO, M.; YAO, J. Finite-time H_∞ adaptive attitude fault-tolerant control for reentry vehicle involving control delay. *Aerospace Science and Technology*, Elsevier, v. 79, p. 246–254, 2018.
- MAO, Q. et al. Reentry attitude control for a reusable launch vehicle with aeroservoelastic model using type-2 adaptive fuzzy sliding mode control. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Wiley Online Library, v. 28, n. 18, p. 5858–5875, 2018.
- MARS, K. *Space Shuttle System*. 2021. Publicado em 14/02/2021. Acessado em 06/10/2021. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/feature/40-years-ago-space-shuttle-columbia-returns-home>>.
- PORTO, M. C. F. Sistema de controle de atitude para foguete de pequeno porte. 2017.
- PREADO; ALMEIDA, A. F. B. de. *A Conquista do Espaço do Sputnik a Missão Centenário*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2007.
- SAMPAIO, R. P. Sistema de controle de atitude embarcado para voo autônomo de aviões em escala. Escola Politécnica/Instituto de Matemática, 2006.
- SPACEX. Falcon user's guide. 2021.
- TOMAYKO, J. E. Computers in spaceflight: The nasa experience. 1988.
- WILSON, J. *Space Shuttle System*. 2006. Publicado em 05/03/2006. Acessado em 06/10/2021. Disponível em: <https://www.nasa.gov/returntoflight/system/system_STS.html>.
- ZOU, Q. et al. Robust adaptive constrained backstepping flight controller design for re-entry reusable launch vehicle under input constraint. *Advances in Mechanical Engineering*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 7, n. 9, p. 1687814015606308, 2015.