



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA
DEPARTAMENTO DE MECATRÔNICA
Engenharia Mecânica-Aeronáutica
MPS-43: Sistemas de Controle

Laboratório 3: Projeto de um Controlador LEAD para a Dinâmica de Arfagem de um foguete Usando o Método do Diagrama de Bode

Nomes: _____

Objetivos: Esta aula prática tem como objetivos:

- modelar a dinâmica de atitude em um grau de liberdade (arfagem) de um foguete atuado por uma tubeira com empuxo vetorável;
- projetar um controlador LEAD em cascata para a planta modelada usando o método do diagrama de Bode;
- verificar o desempenho do sistema projetado usando simulação.

Atenção:

- escreva um *script* em MATLAB (.m) para a realização de todos os cálculos e geração dos gráficos solicitados;
- salve os gráficos, identificando-os com as questões em que foram solicitados.

1 Descrição da Planta

A planta considerada neste laboratório é um foguete atuado por uma tubeira com empuxo vetorável. A vetoração do empuxo pode ser realizada, por exemplo, mediante a montagem da tubeira sobre um gimbal de dois graus de liberdade. Em particular, vamos focar em apenas um grau de liberdade de movimento rotacional do foguete: o movimento de arfagem. A Figura 1 ilustra o foguete, indicando o seu ângulo de arfagem θ bem como o ângulo de vetoração α . Denotamos a magnitude da força de empuxo por f e a distância do centro de massa (CM) ao ponto de atuação de f por l .

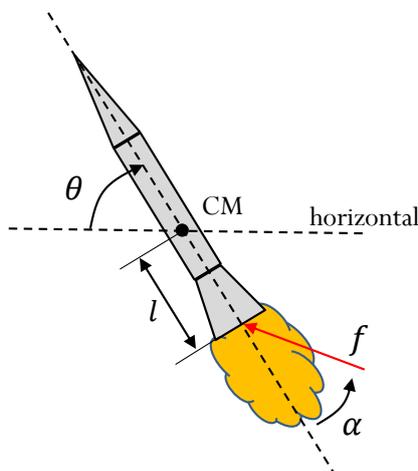


Figura 1: Ilustração de um foguete com tubeira vetorável.

Consideramos ainda que o foguete seja equipado com uma unidade de medidas inerciais, que fornece medidas de θ , entre outros dados de navegação, ao sistema de controle. Por fim, suponha que, durante o período de controle de interesse, o empuxo e as propriedades de massa do foguete se mantenham constantes.

O ângulo de vetorção α é controlado/posicionado por um servomecanismo (que pode ser eletro-hidráulico ou elétrico). Considere que, em relação às dinâmicas de voo, as dinâmicas desse servomecanismo sejam muito rápidas, de forma que possamos assumir que α seja igual ao seu próprio comando. Em outras palavras, quando formos modelar o movimento do veículo, não precisaremos levar em conta as dinâmicas do atuador.

2 Modelagem Matemática

Para modelar a dinâmica do foguete, utilizaremos a lei de Euler:

$$\sum \text{torques} = \frac{d}{dt}H, \quad (1)$$

onde H é o *momentum* angular; a derivada temporal é tomada segundo um observador fixo num referencial inercial.

Questão 1: Usando a equação (1) e denotando o momento de inércia da estrutura do foguete por J , obtenha uma equação de movimento referente ao grau de liberdade θ . Note que essa equação será uma EDO não linear de segunda ordem, com entrada forçante α .

Questão 2: Partindo da equação formulada na Questão 1 e usando o método de linearização por truncamento de série de Taylor, obtenha uma função de transferência para θ em termos de α . Considere que, ao longo do voo, o ângulo α se mantenha próximo de zero.

A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros físicos que devem ser adotados nesta aula.

Tabela 1: Parâmetros ilustrativos do foguete.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Momento de inércia	J	2
Distância CM–Motor	l	0,5
Força de empuxo	f	100

Em seguida, a função de transferência obtida na Questão 2 será usada para projetar um controlador para o ângulo θ .

3 Projeto de um Controlador

Questão 3: Usando o método do diagrama de Bode e adotando a função de transferência obtida na Questão 2 como modelo de projeto, dimensione um controlador LEAD para a dinâmica de arfagem, de forma a satisfazer as especificações de: 1) constante de erro estático de aceleração, $\kappa_a^d = 50$; 2) margem de fase, $\mu_f^d = 60$ graus; margem de ganho, $\mu_g = \infty$. Assim como foi feito em sala de aula, formule sua solução tanto no papel, quanto num *script* MATLAB (.m).

4 Análise e Verificação de Desempenho

Questão 4: Plot o diagrama de Bode compensado, e observe (no gráfico) se as especificações foram satisfeitas. Salve o gráfico e comente.

Questão 5: Calcule os valores do erro em regime permanente que o sistema projetado exibiria caso submetido a entradas de comando do tipo degrau unitário e rampa unitária.

Questão 6: Construa um diagrama Simulink para simular a planta em malha fechada com a lei de controle projetada na Questão 3. Neste diagrama, modele a dinâmica da planta usando a EDO não linear obtida na Questão 1 (este é o chamado modelo verdadeiro ou *ground truth*). Salve o diagrama.

Questão 7: (a) Simule a resposta do sistema a uma entrada de comando do tipo degrau de amplitude 30 graus e meça o tempo de pico e o *overshoot* da variável controlada. (b) Verifique se os valores do erro em regime

permanente para entradas de comando do tipo rampa e degrau correspondem aos calculados na Questão 5. Salve os gráficos e comente.

Questão 8: Simule o sistema de controle projetado usando um comando de arfagem constante de $\bar{\theta} = 30$ graus. Visualize o resultado usando o script de animação disponibilizado pelo professor.

5 Conclusão

Questão 9: Escreva uma conclusão que, de forma direta e sucinta, aponte o que você aprendeu nesta aula prática e qual a relação desses conceitos com o escopo da disciplina MPS-43.