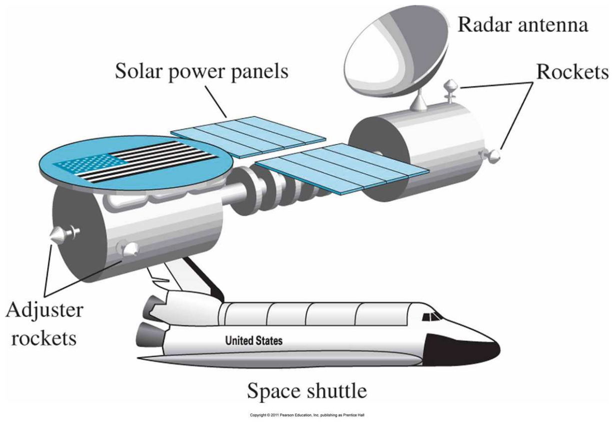
PMR-2360 - Controle e Automação I

2a. Lista de Exercícios - Versão 2014

[Q. 1] Para uma estação orbital, o controle de atitude é fundamental. Para a estação orbital representada na figura abaixo o sistema de controle de atitude em malha fechada possui a função de transferência em malha aberta dada por:

$$G(s)H(s) = \frac{K(s+20)}{s(s^2+24s+144)}. \quad (1)$$



Desenhe o lugar das raízes para este sistema. Calcule a faixa de valores de K que resultam em um sistema de controle em malha fechada oscilatório.

[Q. 2] Desenhe o lugar das raízes para o sistema de controle em malha fechada com a seguinte função de transferência em malha aberta:

$$G(s)H(s) = \frac{K(s+1)}{s^2(s+9)}. \quad (2)$$

Calcule o ponto e o ganho correspondente onde os três pólos são iguais.

[Q. 3] Um sistema de controle em malha fechada com a seguinte função de transferência em malha aberta:

$$G(s)H(s) = \frac{K}{(s+1)(s+3)(s+6)}. \quad (3)$$

(a) Calcule o ponto de saída no eixo real.

(b) calcule o ponto de intersecção das assíntotas.

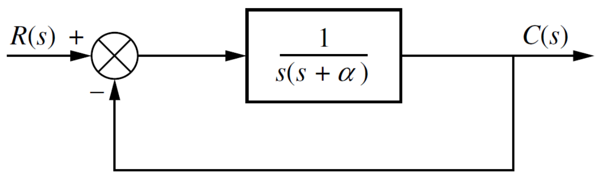
(c) Calcule o valor de K que corresponde ao ponto de saída do eixo real.

[Q. 4] Um sistema de controle para um sistema de testes de suspensão de carros possui um controlador unitário (i.e. $H(s) = 1$) e uma planta dada por:

$$G(s) = \frac{K(s^2+4s+8)}{s^2(s+4)}. \quad (4)$$

Deseja-se escolher K tal que os pólos dominantes tenham um valor de coeficiente de amortecimento $\zeta = 0.5$. Utilizando o lugar das raízes mostre que para este requisito $K = 7.35$ e $s = -1.3 + j2.2$

[Q. 5] O Lugar das Raízes é usualmente calculado em função de um ganho multiplicativo. Algumas vezes estamos interessados na variação de outros parâmetros. Para o sistema da figura abaixo, desenhe o LR para a variação do parâmetro α.



[Q. 6] Um sistema de controle para um laser cirúrgico acoplado a um manipulador com motor CC pode ser utilizado em operações ortopédicas de quadris. Tais cirurgias requerem alta precisão de posição e velocidade. O sistema de controle em malha fechada é dado por:

$$H(s) = K, \tag{5}$$

e

$$G(s) = \frac{1}{s(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}. \tag{6}$$

Onde $\tau_1 = 0.1s$ é a constante elétrica do motor CC e $\tau_2 = 0.2s$ é a constante mecânica do motor CC. O ganho K do controlador deve ser ajustado de tal forma que o erro estático para uma entrada do tipo rampa $r(t) = At$ (onde $A = 1mm/s$) é menor que $0.1mm$ enquanto a estabilidade é mantida. Deseja-se que o erro durante a operação nunca ultrapasse o valor de $0.1mm$. Calcule o ganho K e proponha uma metodologia de operação que garanta os requisitos acima. Obs: Para o cálculo do sobresinal utilize a hipótese de uma entrada a degrau e admita que os pólos complexos sejam dominantes.

[Q. 7] Os motores elétricos de corrente contínua (CC) são largamente utilizados em diversas máquinas de sistemas de manufatura. Um motor elétrico controlado por armadura associado a eventuais engrenagens, sensores para realimentação e uma inércia global fixa, é um sistema de 3a. ordem considerando a posição angular θ como a saída do sistema. Na prática, o sistema é modelado como um sistema de 2a. ordem já que a constante de tempo elétrica do sistema é bem menor que a constante de tempo mecânica.

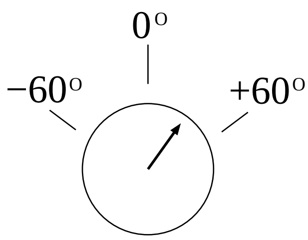
Vamos supor que um motor CC é utilizado numa máquina para efetuar o posicionamento angular de um certo componente.

Projete um sistema de controle para esta máquina segundo as seguintes hipóteses:

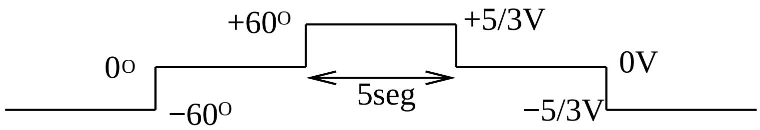
- O modelo completo deste sistema pode ser escrito como:

$$G(s) = \frac{4}{s(s+10)}. \tag{7}$$

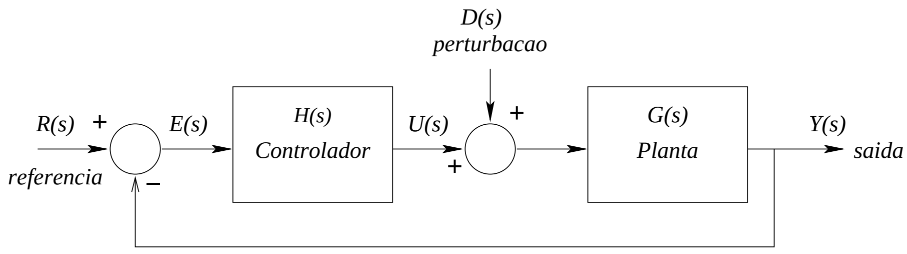
- Este componente funciona apenas em 3 posições angulares: -60^o, 0^o e $+60^o$ como indicado na Figura abaixo.



- O motor opera num intervalo de tensão de [-5V,+5V] o que corresponde ao sinal do sensor de posição no intervalo $[-180^o, 180^o]$.
- O padrão de operação pode ser representado pela Figura abaixo contendo o sinal de referência utilizado na entrada do sistema de controle.



- A representação do sistema de controle está ilustrado na Figura abaixo.



- O controlador que deve ser utilizado é um controlador proporcional, i.e., $H(s) = K_p$.
- O motor é sujeito a um distúrbio eventual que pode ser modelado através de um degrau equivalente a $\pm 1V$, ou seja, $D(s) = 1/s$.
- A especificação do sistema de controle requer que o tempo de assentamento do sistema t_s seja menor do que 1 seg, e que o erro transitório ou estático seja sempre menor do que 6^o, ou seja, cerca de 10% do valor do degrau (60^o).

[Q. 8] O sistema de controle automático de helicópteros é necessário pelo fato do sistema ser inerentemente instável. O sistema de controle de um helicóptero pode ser representado através da figura abaixo onde dois controladores podem atuar o sistema de controle automático e o controle do piloto através do manche. Quando o piloto não está utilizando o manche a chave pode ser considerada como estando aberta. A dinâmica do helicóptero pode ser representada pela seguinte função de transferência:

$$G_2(s) = \frac{25(s + 0.03)}{(s + 0.4)(s^2 - 0.36s + 0.16)}, \tag{8}$$

a função de transferência da ação de controle do piloto é dada por:

$$G_P(s) = \frac{K_1}{s^2 + 12s + 1}, \tag{9}$$

e a função de transfeência do controle automático é dada por:

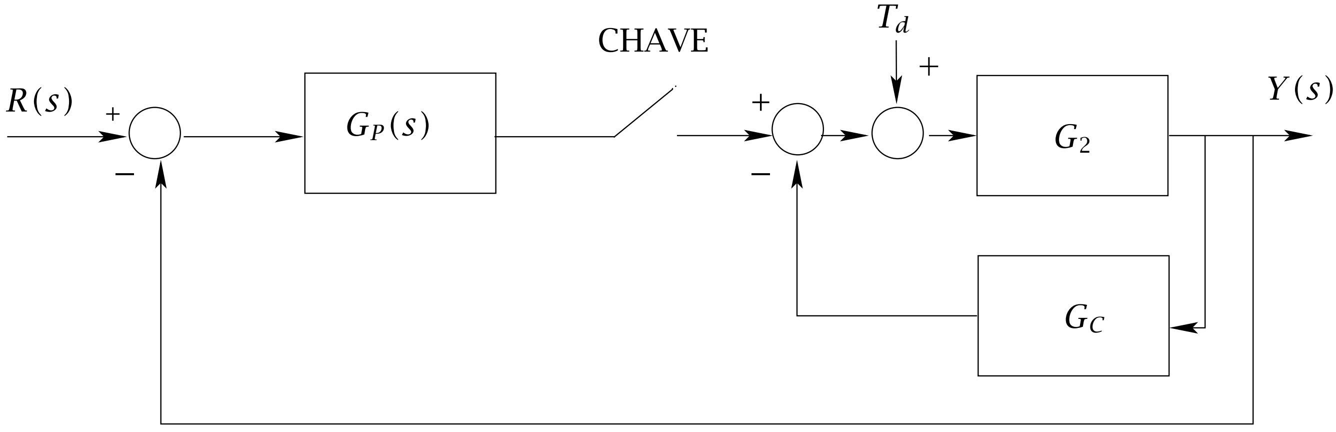
$$G_C(s) = \frac{K_2(s + 1)}{(s + 9)}. \tag{10}$$

(a) Com a ação de controle do piloto desligada, determine o lugar das raízes. Determine o ganho K_2 que resulta num amortecimento de $\zeta = 0.707$

(b) Para o ganho K_2 obtido no item anterior determine o erro estático devido a um distúrbio $T_d(s) = 1/s$.

(c) Com a ação de controle do piloto adicionada, desehe o lugar das raízes para K_1 variando de zero a ∞ quando K_2 assume o valor calculado no ítem (a).

(d) Recalcule o erro estático da parte (b) quando K_1 possui um valor adequado.



[Q. 9] Considere um sistema de controle, como na figura abaixo, onde:

$$G(s) = \frac{K_P}{s(s+a)} \quad a = 15, K_P = 20. \tag{11}$$

e o controlador $H(s)$ é dado por:

$$H(s) = K. \tag{12}$$

Deseja-se que o sistema de controle em malha fechada atenda às seguintes especificações:

- Erro estacionário $e_{ss} = 0$;
- Tempo de assentamento $t_s < 1seg$;
- e Máximo sobresinal $M_P < 10\%$.

(a) Identifique o Lugar Geométrico aonde residem os pólos do sistema de 2a. ordem padrão,

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \tag{13}$$

que satisfazem as especificações dinâmicas acima.

(b) Desenhe o Lugar das Raízes para o sistema de controle proposto.

(c) Determine a faixa de valores K de tal forma que o sistema de controle em malha fechada seja estável.

(d) Utilizando a técnica do lugar das raízes, projete um controlador $H(s) = K$ de tal forma a atender as especificações acima. Justifique.

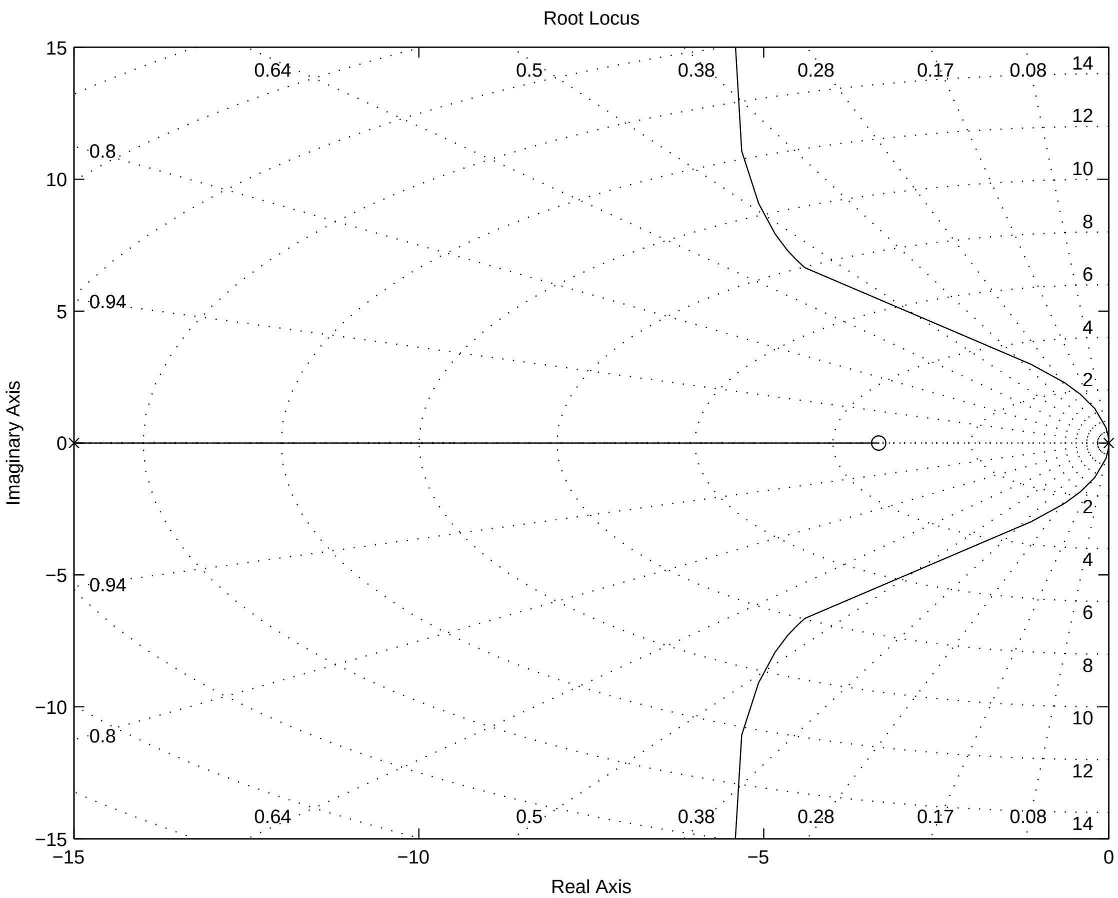
(e) Suponha que a planta $G(s)$ sofre uma variação paramétrica onde o parâmetro a varia numa faixa definida por [14,16]. Dentro deste contexto, calcule a faixa de valores de K de tal forma que o desempenho seja atendido mesmo que o parâmetro a varie dentro da faixa especificada.

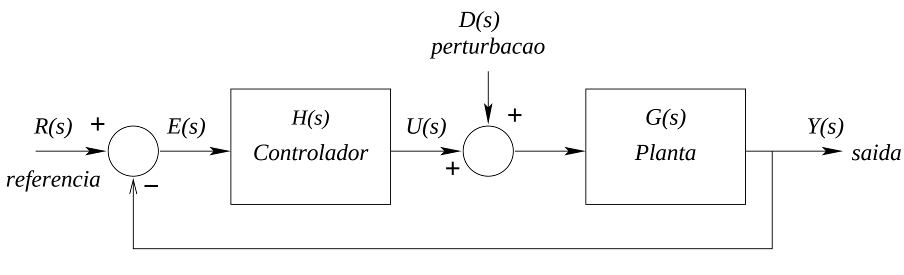
(f) Para um distúrbio do tipo $d(t) = C$ (considerando $R(s) = 0$) o controlador projetado consegue rejeitá-lo em regime estático ?

(g) Suponha que um controlador do tipo PI foi escolhido para este sistemas de controle ou seja,

$$H(s) = K\left(1 + \frac{1}{T_i s}.\right) \tag{14}$$

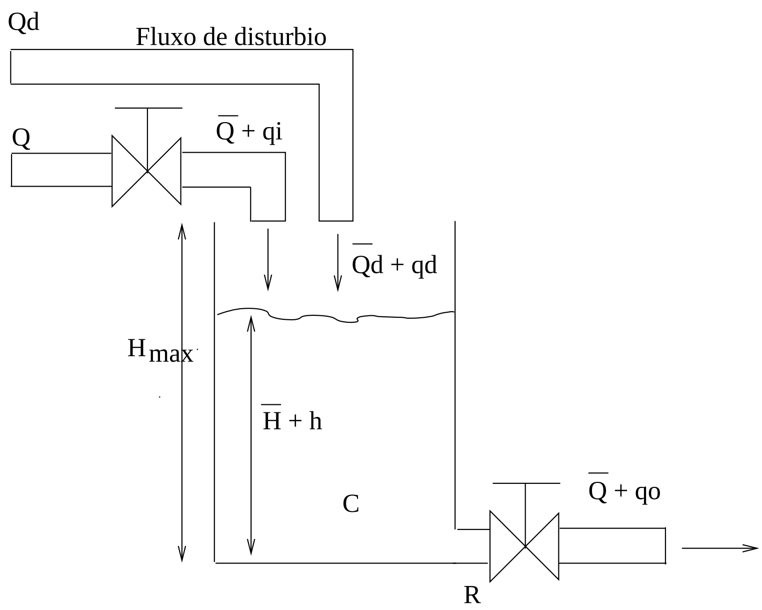
No projeto escolheu-se $T_i = 0.25$. Neste caso o Lugar das Raízes resultante é ilustrado na figura abaixo. É possível projetar um valor de K tal que o sistema de controle satisfaz as especificações ? O Sistema de controle rejeita o distúrbio $d(t) = C$ em regime estático ?





[Q. 10] Um sistema de controle de nível de líquidos, ilustrado na figura abaixo, é um sistema com características não lineares, onde:

- H é a altura do líquido (m),
- Q é o fluxo de líquido gen'erico (m^3/seg),
- Q_d é o fluxo de líquido de perturbação que não pode ser controlado (m^3/seg),
- R é a resistência ao fluxo de líquido e é definida como a variação no nível de líquido H causada pela variação no fluxo Q,
- C é a capacitância do reservatório e é definida a variação no volume de líquido armazenado causada pela variação na altura H.
- q_i é a variação do fluxo de entrada,
- q_o é a variação do fluxo de saída,
- q_d é a variação do fluxo de perturbação,
- h é a variação da altura.

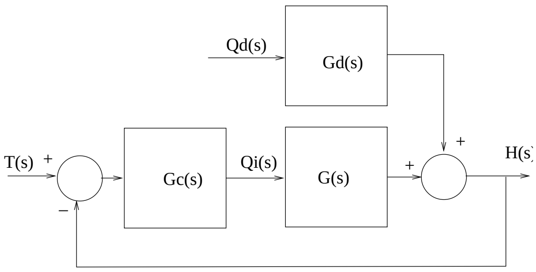


O sistema pode ser representado através de funções de transferência realizando uma linearização do sistema em torno de um ponto de operação nominal estacionário $(\overline{H}, \overline{Q})$. A equação linearizada que descreve o sistema é dada por:

$$C\frac{dh}{dt} + \frac{1}{R}h = q_i + q_d. \tag{15}$$

Desta forma, a função de transferência de h em função de q_i e q_d são iguais.

Um sistema de controle em malha fechada pode ser representado da seguinte forma:



Pergunta-se:

(a) O sistema em malha aberta, considerando apenas $G(s)$ consegue manter o erro estacionário e_{ss} a degrau nulo, i.e., $e_{ss} = 0$?

(b) Caso seja utilizado um controlador proporcional $G_c(s) = K_p$ é possível obter erro estacionário e_{ss} nulo para entrada a degrau ?

(c) Deseja-se projetar um controlador do tipo integral $G_c(s) = K_i/s$. Admitindo que $R = 0.01$ e $C = 300$ para o ponto de operação estático desejado, projete o controlador de tal forma que:

- o sistema nunca transborde mesmo que o sinal de referência $T(s)$ coloque o sistema para operar em $H_{\max}$,
- tempo de assentamento $t_s < 100seg$.

(d) Utilizando o controlador $G_c(s)$ projetado no ítem anterior não é possível anular um distúrbio do tipo degrau $Q_d(s) = A/s$. Entretanto é possível diminuir o efeito do distúrbio aumentando o valor de K_i. Qual é o maior valor de K_i que pode ser utilizado mantendo as especificações de projeto ?

(e) Projete um novo controlador $G_c(s)$ que possibilite a eliminação do efeito de um distúrbio do tipo degrau $Q_d(s) = A/s$ mantendo as especificações de projeto acima.

[Q. 11] O controle de injeção de insulina pode ajudar a vida de pacientes diabéticos, que o fazem diariamente através de injeção. A insulina é um hormônio que regula o nível de glicose do sangue (glicemia). O sistema de controle é composto por uma bomba e um sensor de glicemia, como indicado na figura abaixo. Considera-se um sensor ideal (função de transferência unitária) e um controlador com dois parâmetros a ajustar: K e α. A unidade temporal das funções de transferência é dada em horas.

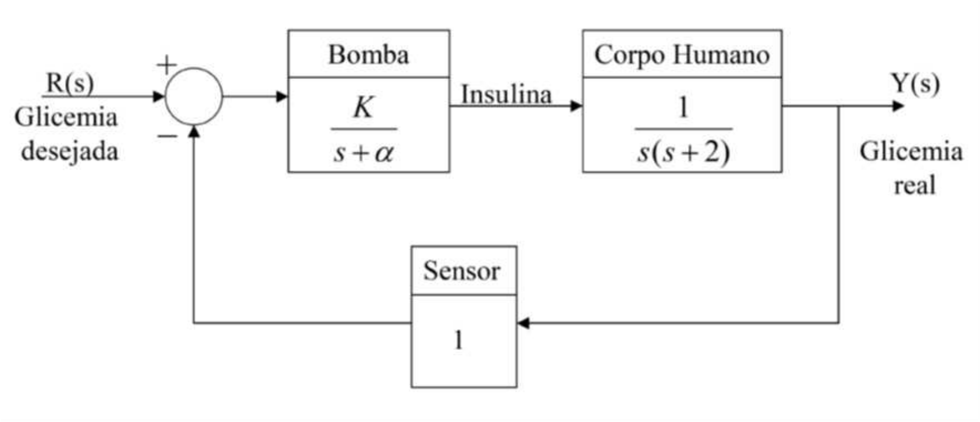


Figura 1: Sistema de controle de injeção de insulina.

Deseja-se que o sistema em Malha apresente Máximo Sobressinal $M_p \leq 7\%$ e tempo de acomodação $t_s \leq 4h$ (Critério de 2%).

(a) Localize no plano complexo o lugar geométrico para os pólos de um sistema sub-amortecido de 2a. ordem que satisfaçam os critérios acima.

(b) Calcule a função de transferência em malha fechada do sistema em análise.

(c) Considerando o conceito de pólos dominantes, calcule K e α para satisfazer os critérios de desempenho. Justifique, posicionando os novos pólos no plano complexo.

[Q. 12] (Para o avião militar F4-E, o movimento de arfagem (*pitch*, rotação em torno do eixo y) θ é controlado por $\delta_{com}(s)$, um sinal de comando que depende do ângulo do profundor (*elevator*) δ_e e do *canard* δ_c, i.e., $\delta_{com} = f(\delta_e, \delta_c)$. A função de transferência do sistema é dada por:

$$\frac{\theta(s)}{\delta_{com}(s)} = G(s) = -\frac{-508(s+1.6)}{(s+14)(s-1.8)(s+4.9)}. \tag{16}$$

Figura 2: F4-E.

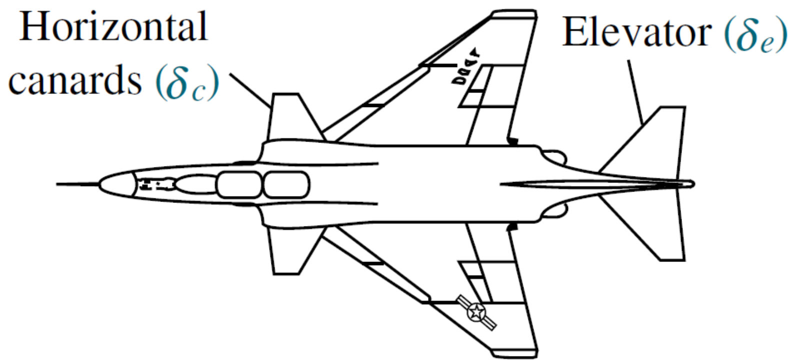


Figura 3: Detalhe do elevator e canard.

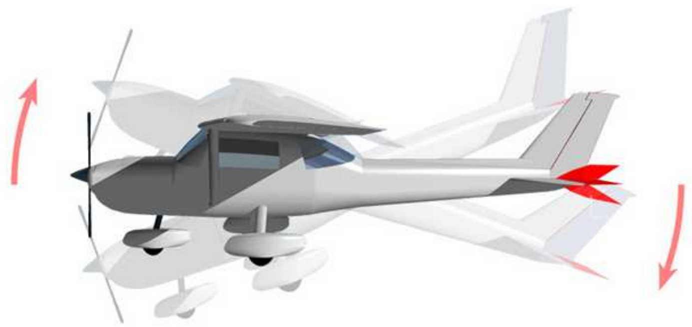


Figura 4: Movimento de *pitch*.

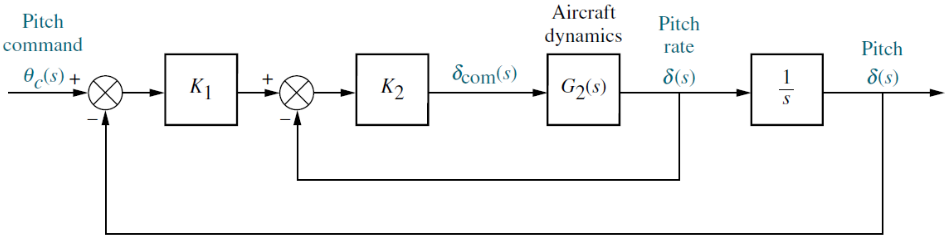


Figura 5: Diagrama de blocos.

Pede-se:

(a) Desenhe o Lugar das Raízes da malha interna.

(b) Calcule a faixa de valores de K_2 para a estabilidade da malha interna.

(c) Calcule o valor de K_2 que corresponda a $\zeta = 0.5$ para a malha interna.

(d) Para o valor de K_2 calculado no ítem anterior calcule a faixa de valores de K_1 que mantém o sistema estável.

(e) Calcule o valor de K_1 para que o sistema de controle em malha fechada possua pólos complexos conjugados com $\zeta = 0.45$.