Trabajo 1: Funciones de Transferencia Open Loop Aviones

1 Descripción
- 1.1 Método A: Ecuaciones Adimensionales
- 1.2 Método B: Ecuaciones Dimensionales

2 Entregables
- 2.1 Funciones de Transferencia Factorizadas
- 2.2 Diagrama de Bode
- 2.3 Diagrama de Nichols
- 2.4 Respuesta Temporal: Salto Escalón Unitario
- 2.5 Respuesta Temporal: Rampa Unitaria
- 2.6 Código Fuente.

3 Datos

Trabajo 1:
Funciones de Transferencia Open Loop Aviones
MUIA (2021/22)
FCS

1 Descripción

Obtener las funciones de transferencia <u>dimensionales</u> en lazo abierto a partir de las características geométricas y másicas del avión y de sus derivadas de estabilidad (en ejes estabilidad) para una condición de referencia de vuelo simétrico, rectilíneo, estacionario, horizontal y con alas a nivel.

T3: Aplicación a un Avión Turbojet bimotor (Learjet 24) volando en régimen de crucero a MTOW

Flight Condition	Geometric Data	Weight and Balance
$h_s = 40000\ ft\ ; M_s = 0.70$ $u_s = 677\frac{ft}{s};\ q_s = 134.6\frac{lb}{ft^2};$ $\alpha_{x_B - x_s} = 2.7º$	$S_w = 230\ ft^2\ ; c = 7.0\ ft\ ;\ \ b = 34.0\ ft$	$m = 13000\ lb\ ;$ $I_{XX_B} = 28000\ slgft^2;\ I_{YY_B} = 18800\ slgft^2;$ $I_{ZZ_B} = 47000\ slgft^2;\ I_{XZ_B} = 1300\ slgft^2;$
Reference Condition $C_{L_s} = 0.410\ ;\ C_{D_s} = 0.0335\ ;$ $C_{Tx_s} = 0.0335\ ;$ $C_{m_s} = 0\ ;\ C_{mT_s} = 0\ ;$	**Dimensionless Long. Stability Derivatives:** $C_{D_0} = 0.0216\ ;\ C_{D_{\hat{u}}} = 0.104\ ;\ C_{D_\alpha} = 0.300\ ;$ $C_{Tx_{\hat{u}}} = -0.07\ ;$ $C_{L_0} = 0.130\ ;\ C_{L_{\hat{u}}} = 0.400\ ;\ C_{L_\alpha} = 5.840\ ;$ $C_{L_{\dot{\hat{\alpha}}}} = 2.20\ ;\ C_{L_{\hat{q}}} = 4.70\ ;$ $C_{m_0} = 0.050;\ C_{m_{\hat{u}}} = 0.050;\ C_{m_\alpha} = -0.640;$ $C_{m_{\dot{\hat{\alpha}}}} = -6.70\ ;\ C_{m_{\hat{q}}} = -15.5\ ;$ $C_{mT_{\hat{u}}} = -0.003;\ C_{mT_\alpha} = 0;$ $C_{D_{\delta_e}} = 0\ ;\ C_{L_{\delta_e}} = 0.460;\ C_{m_{\delta_e}} = -1.24;$ $C_{D_{i_h}} = 0\ ;\ C_{L_{i_h}} = 0.940;\ C_{i_{\delta_h}} = -2.50;$	**Dimensionless Lat-Dir Stability Derivatives:** $C_{l_\beta} = -0.110\ ;\ C_{l_{\hat{p}}} = -0.450\ ;\ C_{l_{\hat{r}}} = 0.160\ ;$ $C_{Y_\beta} = -0.730\ ;\ C_{Y_{\hat{p}}} = 0\ ;\ C_{Y_{\hat{r}}} = 0.400\ ;$ $C_{n_\beta} = 0.127\ ;\ C_{n_{\hat{p}}} = -0.008\ ;\ C_{n_{\hat{r}}} = -0.200\ ;$ $C_{nT_\beta} = 0;$ $C_{l_{\delta_a}} = 0.178\ ;\ C_{l_{\delta_r}} = -0.0190\ ;$ $C_{Y_{\delta_a}} = 0\ ;\ C_{Y_{\delta_r}} = -0.140\ ;$ $C_{n_{\delta_a}} = -0.02\ ;\ C_{n_{\delta_r}} = 0.0740\ ;$

1 Descripción

1.1 Método A: Ecuaciones Adimensionales

- Se parte de las ecuaciones adimensionales para el estudio del movimiento longitudinal o lateral-direccional.

Ecuaciones longitudinales

$$
\begin{aligned}
&(2\mu \mathrm{D} - C_{X\hat{u}})\Delta\hat{u} - C_{X\alpha}\Delta\alpha - C_{Zs}\Delta\theta = C_{X\delta_e}\Delta\delta_e \\
&-(C_{Z\hat{u}} + 2C_{Zs})\Delta\hat{u} + ((2\mu - C_{Z\hat{\dot{\alpha}}})\mathrm{D} - C_{Z\alpha})\Delta\alpha - (2\mu + C_{Z\hat{q}})\mathrm{D}\Delta\theta = C_{Z\delta_e}\Delta\delta_e \\
&-C_{m\hat{u}}\Delta\hat{u} - (C_{m\hat{\dot{\alpha}}}\mathrm{D} + C_{m\alpha})\Delta\alpha + (\hat{I}_y\mathrm{D}^2 - C_{m\hat{q}}\mathrm{D})\Delta\theta = (C_{m\hat{\dot{\delta}}_e}\mathrm{D} + C_{m\delta_e})\Delta\delta_e \\
&\mathrm{D}\Delta\theta = \Delta\hat{q}
\end{aligned}
$$

Ecuaciones lateral-direccionales

$$
\begin{aligned}
&(2\mu \mathrm{D} - C_{Y\beta})\Delta\beta - C_{Y\hat{p}}\Delta\hat{p} + (2\mu - C_{Y\hat{r}})\Delta\hat{r} + C_{zs}\Delta\phi = C_{Y\delta_r}\Delta\delta_r \\
&-C_{l\beta}\Delta\beta + (\hat{I}_x\mathrm{D} - C_{l\hat{p}})\Delta\hat{p} - (\hat{J}_{xz}\mathrm{D} + C_{l\hat{r}})\Delta\hat{r} = (C_{l\hat{\dot{\delta}}_a}\mathrm{D} + C_{l\delta_a})\Delta\delta_a + C_{l\delta_r}\Delta\delta_r \\
&-C_{n\beta}\Delta\beta - (\hat{J}_{xz}\mathrm{D} + C_{n\hat{p}})\Delta\hat{p} + (\hat{I}_z\mathrm{D} - C_{n\hat{r}})\Delta\hat{r} = C_{n\delta_a}\Delta\delta_a + (C_{n\hat{\dot{\delta}}_r}\mathrm{D} + C_{n\delta_r})\Delta\delta_r \\
&\mathrm{D}\Delta\phi = \Delta\hat{p} \\
&\mathrm{D}\Delta\psi = \Delta\hat{r}
\end{aligned}
$$

1 Descripción

1.1 Método A: Ecuaciones Adimensionales

- Se calculan los parámetros geométricos y másicos adimensionales.

$$
\mu = \frac{m}{\rho S \frac{c}{2}};\ \hat{I}yy = \frac{Iyy}{\rho S \left(\frac{c}{2}\right)^3}
$$

$$
\mu = \frac{m}{\rho S \frac{b}{2}};\hat{I}xx = \frac{Ixx}{\rho S \left(\frac{b}{2}\right)^3};\ \hat{I}zz = \frac{Izz}{\rho S \left(\frac{b}{2}\right)^3}\ ;\ \hat{P}xz = \frac{Pxz}{\rho S \left(\frac{b}{2}\right)^3}
$$

- Se obtienen las ecuaciones dimensionales en el dominio del tiempo

$$
D = \frac{d}{dt}\frac{c}{2u_s};\Delta\hat{u} = \frac{\Delta u}{u_s}\ ;\Delta\hat{q} = \Delta \mathrm{q}\ \frac{c}{2u_s}
$$

$$
D = \frac{d}{dt}\frac{b}{2u_s};\ \Delta\hat{p} = \Delta \mathrm{p}\ \frac{b}{2u_s};\ \Delta\hat{r} = \Delta \mathrm{r}\ \frac{b}{2u_s}
$$

- Se realiza la transformada de Laplace para transformar el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias en un sistema de ecuaciones algebraicas.
- Se resuelve mediante Cramer

1 Descripción

1.2 Método B: Ecuaciones Dimensionales

- Se parte de las ecuaciones dimensionales para el estudio del movimiento longitudinal o lateral-direccional.

Ecuaciones longitudinales

$\theta_s = 0$

$$\left(X_u - m\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)\Delta u + X_w \Delta w - mg\cos\theta_s \Delta\theta = -X_{\delta_e}\Delta\delta_e$$

$$Z_u\Delta u + \left(Z_w + (Z_{\dot w} - m)\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)\Delta w + \left((Z_q + mu_s)\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} - mg\sin\theta_s\right)\Delta\theta = -Z_{\delta_e}\Delta\delta_e$$

$$M_u\Delta u + \left(M_w + M_{\dot w}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)\Delta w + \left(M_q\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} - I_y\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}\right)\Delta\theta = -\left(M_{\delta_e} + M_{\dot\delta_e}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)\Delta\delta_e$$

$$\frac{\mathrm{d}\Delta\theta}{\mathrm{d}t} = \Delta q$$

Ecuaciones lateral-direccionales

$\theta_s = 0$

$$\left(Y_v - m\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)\Delta v + Y_p\Delta p + (Y_r - mu_s)\Delta r + mg\cos\theta_s\Delta\phi = -Y_{\delta_r}\Delta\delta_r$$

$$L_v\Delta v + \left(L_p - I_x\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)\Delta p + \left(L_r + J_{xz}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)\Delta r = -\left(L_{\delta_a} + L_{\dot\delta_a}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)\Delta\delta_a - L_{\delta_r}\Delta\delta_r$$

$$N_v\Delta v + \left(N_p + J_{xz}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)\Delta p + \left(N_r - I_z\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)\Delta r = -N_{\delta_a}\Delta\delta_a - \left(N_{\delta_r} + N_{\dot\delta_r}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)\Delta\delta_r$$

$$\frac{\mathrm{d}\Delta\phi}{\mathrm{d}t} = \Delta p + \tan\theta_s\Delta r$$

$$\frac{\mathrm{d}\Delta\psi}{\mathrm{d}t} = \sec\theta_s\Delta r$$

1 Descripción

1.2 Método B: Ecuaciones Dimensionales

- Se obtienen la derivadas de estabilidad dimensionales

X_u , X_w , X_{δ_e}

Z_u , Z_w , $Z_{\dot w}$, Z_q , Z_{δ_e}

M_u , M_w , $M_{\dot w}$, M_q , M_{δ_e} , $M_{\dot\delta_e}$

	X	Z	M
$\frac{\partial}{\partial u}$	$\rho u_s S C_{Xs} + \frac{\rho u_s S}{2} C_{X\hat u}$	$\rho u_s S C_{Zs} + \frac{\rho u_s S}{2} C_{Z\hat u}$	$\frac{\rho u_s S c}{2} C_{m\hat u}$
$\frac{\partial}{\partial w}$	$\frac{\rho u_s S}{2} C_{X\alpha}$	$\frac{\rho u_s S}{2} C_{Z\alpha}$	$\frac{\rho u_s S c}{2} C_{m\alpha}$
$\frac{\partial}{\partial \dot w}$		$\frac{\rho S c}{4} C_{Z\hat{\dot\alpha}}$	$\frac{\rho S c^2}{4} C_{m\hat{\dot\alpha}}$
$\frac{\partial}{\partial q}$		$\frac{\rho u_s S c}{4} C_{Z\hat q}$	$\frac{\rho u_s S c^2}{4} C_{m\hat q}$
$\frac{\partial}{\partial \delta_e}$	$\frac{\rho u_s^2 S}{2} C_{X\delta_e}$	$\frac{\rho u_s^2 S}{2} C_{Z\delta_e}$	$\frac{\rho u_s^2 S c}{2} C_{m\delta_e}$
$\frac{\partial}{\partial \dot\delta_e}$			$\frac{\rho u_s S c^2}{4} C_{m\hat{\dot\delta}_e}$

1 Descripción

1.2 Método B: Ecuaciones Dimensionales

✈ Se obtienen la derivadas de estabilidad dimensionales

Y_v, Y_p, Y_r, Y_{δ_r}

L_v, L_p, L_r, L_{δ_a}, $L_{\dot{\delta}_a}$, L_{δ_r}

N_v, N_p, N_r, N_{δ_a}, N_{δ_r}, $N_{\dot{\delta}_r}$

	Y	L	N
$\frac{\partial}{\partial v}$	$\frac{\rho u_s S}{2} C_{Y\beta}$	$\frac{\rho u_s Sb}{2} C_{l\beta}$	$\frac{\rho u_s Sb}{2} C_{n\beta}$
$\frac{\partial}{\partial p}$	$\frac{\rho u_s Sb}{4} C_{Y\hat{p}}$	$\frac{\rho u_s Sb^2}{4} C_{l\hat{p}}$	$\frac{\rho u_s Sb^2}{4} C_{n\hat{p}}$
$\frac{\partial}{\partial r}$	$\frac{\rho u_s Sb}{4} C_{Y\hat{r}}$	$\frac{\rho u_s Sb^2}{4} C_{l\hat{r}}$	$\frac{\rho u_s Sb^2}{4} C_{n\hat{r}}$
$\frac{\partial}{\partial \delta_a}$		$\frac{\rho u_s^2 Sb}{2} C_{l\delta_a}$	$\frac{\rho u_s^2 Sb}{2} C_{n\delta_a}$
$\frac{\partial}{\partial \dot{\delta}_a}$		$\frac{\rho u_s Sb^2}{4} C_{l\hat{\dot{\delta}}_a}$	
$\frac{\partial}{\partial \delta_r}$	$\frac{\rho u_s^2 S}{2} C_{Y\delta_r}$	$\frac{\rho u_s^2 Sb}{2} C_{l\delta_r}$	$\frac{\rho u_s^2 Sb}{2} C_{n\delta_r}$
$\frac{\partial}{\partial \dot{\delta}_r}$			$\frac{\rho u_s Sb^2}{4} C_{n\hat{\dot{\delta}}_r}$

Trabajo 1:
Funciones de Transferencia Open Loop Aviones

MUIA (2021/22)
FCS

1 Descripción

1.1 Método B: Ecuaciones Dimensionales

✈ Se expresa el sistema en la forma $\boxed{E\dot{\vec{X}}(t) = A'\vec{X}(t) + B'\vec{U}(t)}$

- Canal Longitudinal $\boxed{\vec{X}(t) = \{\Delta u\,(t), \Delta\alpha(t), \Delta\theta(t), \Delta q(t)\} \;\; \vec{\delta}(t) = \{\Delta\delta e(t)\}}$
- Canal Lateral-Direccional $\boxed{\vec{X}(t) = \{\Delta\beta(t), \Delta p(t), \Delta r(t), \Delta\phi(t)\}; \;\; \vec{\delta}(t) = \{\Delta\delta a(t), \Delta\delta r(t)\}}$

✈ Se transforma el sistema en la forma estándar $\boxed{\dot{\vec{X}}(t) = A\vec{X}(t) + B\vec{U}(t)}$

- Se realiza la transformada de Laplace y se resuelve matricialmente

$$\boxed{\begin{gathered} s[I]\dot{\vec{X}}(s) = A\vec{X}(s) + B\vec{U}(s) \\ \{s[I] - A\}\vec{X}(s) = B\vec{U}(s) \\ \vec{X}(s) = (\{s[I] - A\}^{-1})B\vec{U}(s) \end{gathered}}$$

2 Entregables

- Los grupos ya están establecidos y su composición publicada en el Moodle de la asignatura.
- **El martes 12 de Octubre, se enviará a cada grupo los datos correspondientes a su avión.**
- Todos los entregables se deben comprimir en un único .zip con el nombre FCS01_21_XX, siendo XX el grupo asignado, y se enviarán a las siguientes direcciones de correo electrónico antes del **domingo 31 de Octubre de 2021**

  miguelangel.gomez@upm.es

  manuel.perez@upm.es

  - El informe se deberá enviar en formato PDF y su título será FCS01_21_XX.pdf
  - El tamaño máximo del fichero .zip no debe superar los 5MB.

- Para poder realizar el segundo trabajo de la asignatura es **OBLIGATORIO** haber liberado esta primera parte con una Nota ≥ 5.0

Trabajo 1:
Funciones de Transferencia Open Loop Aviones

MUIA (2021/22)
FCS

2 Entregables

2.1 Funciones de Transferencia Factorizadas

- Calcular las siguientes funciones de transferencia en Open-Loop:
  - Canal Longitudinal

$$[G(s)]_{u\delta e} = \frac{\Delta u(s)}{\Delta \delta e(s)};\ [G(s)]_{\theta\delta e} = \frac{\Delta \theta(s)}{\Delta \delta e(s)};\ [G(s)]_{\alpha\delta e} = \frac{\Delta \alpha(s)}{\Delta \delta e(s)};\ [G(s)]_{q\delta e} = \frac{\Delta q(s)}{\Delta \delta e(s)}$$

  - Canal Lateral-Direccional

$$[G(s)]_{p\delta a} = \frac{\Delta p(s)}{\Delta \delta a(s)};\ [G(s)]_{r\delta a} = \frac{\Delta r(s)}{\Delta \delta a(s)};$$
$$[G(s)]_{\beta\delta r} = \frac{\Delta \beta(s)}{\Delta \delta r(s)};\ [G(s)]_{r\delta r} = \frac{\Delta r(s)}{\Delta \delta r(s)};$$

  - Unidades: u → m/s; Ángulos en grados

- Cada función de transferencia se deberá expresar en forma factorizada:

$$\frac{\Delta\theta(s)}{\Delta\delta e(s)} = K_{\theta\delta e}\frac{[\tau_{\theta_1}s+1][\tau_{\theta_2}s+1]}{\left[\left(\frac{s}{w_{n_{SP}}}\right)^2+\left(\frac{2\xi_{SP}s}{w_{n_{SP}}}\right)+1\right]\left[\left(\frac{s}{w_{n_P}}\right)^2+\left(\frac{2\xi_{P}s}{w_{n_P}}\right)+1\right]}$$

$$\frac{\Delta\psi(s)}{\Delta\delta a(s)} = K_{r\delta a}\frac{[\tau_{\psi}s+1]\left[\left(\frac{s}{w_{\psi}}\right)^2+\left(\frac{2\xi_{\psi}s}{w_{\psi}}\right)+1\right]}{s[\tau_s s+1][\tau_r s+1]\left[\left(\frac{s}{w_{n_{DR}}}\right)^2+\left(\frac{2\xi_{DR}s}{w_{n_{DR}}}\right)+1\right]}$$

2 Entregables

2.2 Diagrama de Bode

- ✈ Dibujar el diagrama de Bode de cada una de las funciones de transferencia calculadas en el apartado 2.1:
  - Frecuencia [rd/s], Curva de Módulos [dB], Curva de Fases [º].
  - Frecuencia en escala logarítmica.
  - El rango de frecuencias debe incluir todos los modos propios del avión. Por ejemplo:
    - Canal Longitudinal: [10^{-2} – 10^{+2}]
    - Canal Lateral-Direccional: [10^{-5} – 10^{+2}]
  - Se debe utilizar el mismo rango de frecuencias para todas las funciones de transferencia de cada canal
- ✈ Tabular el módulo de la repuesta en frecuencia (dB) de cada función de transferencia a las frecuencias de los modos propios:

Canal Longitudinal

$$
\begin{gathered}
|[G(w_P)]_{u\delta e}| \; ; \; |[G(w_{SP})]_{u\delta e}| \\
|[G(w_P)]_{\alpha\delta e}| \; ; \; |[G(w_{SP})]_{\alpha\delta e}| \\
|[G(w_P)]_{\theta\delta e}| \; ; \; |[G(w_{SP})]_{\theta\delta e}| \\
|[G(w_P)]_{q\delta e}| \; ; \; |[G(w_{SP})]_{q\delta e}|
\end{gathered}
$$

Canal Lateral-Direccional

$$
\begin{gathered}
|[G(w_{DR})]_{p\delta a}| \; ; \; |[G(1/\tau_R)]_{p\delta a}| \; ; \; |[G(1/\tau_S)]_{p\delta a}| \\
|[G(w_{DR})]_{r\delta a}| \; ; \; |[G(1/\tau_R)]_{r\delta a}| \; ; \; |[G(1/\tau_S)]_{r\delta a}| \\
|[G(w_{DR})]_{\beta\delta r}| \; ; \; |[G(1/\tau_R)]_{\beta\delta r}| \; ; \; |[G(1/\tau_S)]_{\beta\delta r}| \\
|[G(w_{DR})]_{r\delta r}| \; ; \; |[G(1/\tau_R)]_{r\delta r}| \; ; \; |[G(1/\tau_S)]_{r\delta r}|
\end{gathered}
$$

2 Entregables

2.3 Diagrama de Nichols

- ✈ Dibujar el diagrama de Nichols de cada una de las funciones de transferencia calculadas en el apartado 2.1:
  - Frecuencia [rd/s], Curva de Módulos [dB], Curva de Fases [º].
  - Utilizar el mismo rango de frecuencias (rd/s), módulos (dB) y fases (º) que el seleccionado para el diagrama de Bode

2.4 Respuesta Temporal: Salto Escalón Unitario

- ✈ Dibujar la respuesta temporal a una entrada salto escalón unitario de un grado para las funciones de transferencia obtenidas en el apartado 2.1:
  - Seleccionar una escala de tiempos adecuada para visualizar la respuesta transitoria y otra para la respuesta permanente del avión y presentar los resultados en sendas gráficas.
  - Tabular el valor estacionario y relacionar dicho resultado con la ganancia estática del sistema: razonar los resultados obtenidos.
  - Tabular el overshoot o undershoot del sistema y razonar los resultados obtenidos.

2 Entregables

2.5 Respuesta Temporal: Rampa Unitaria Saturada

- Dibujar la respuesta temporal a una entrada tipo rampa de amplitud 1º e introducida en un tiempo de 10 segundos para las funciones de transferencia obtenidas en el apartado 2.1:
  - Seleccionar una escala de tiempos adecuada para visualizar la respuesta transitoria y otra para la respuesta permanente del avión y presentar los resultados en sendas gráficas.
  - Tabular el valor estacionario y relacionar dicho resultado con la ganancia estática del sistema: razonar los resultados obtenidos.
  - Comentar las semejanzas/diferencias en la respuesta respecto a la entrada salto escalón en términos de overshoot o undershoot, valor estacionario y modos excitados.

2.6 Código Fuente

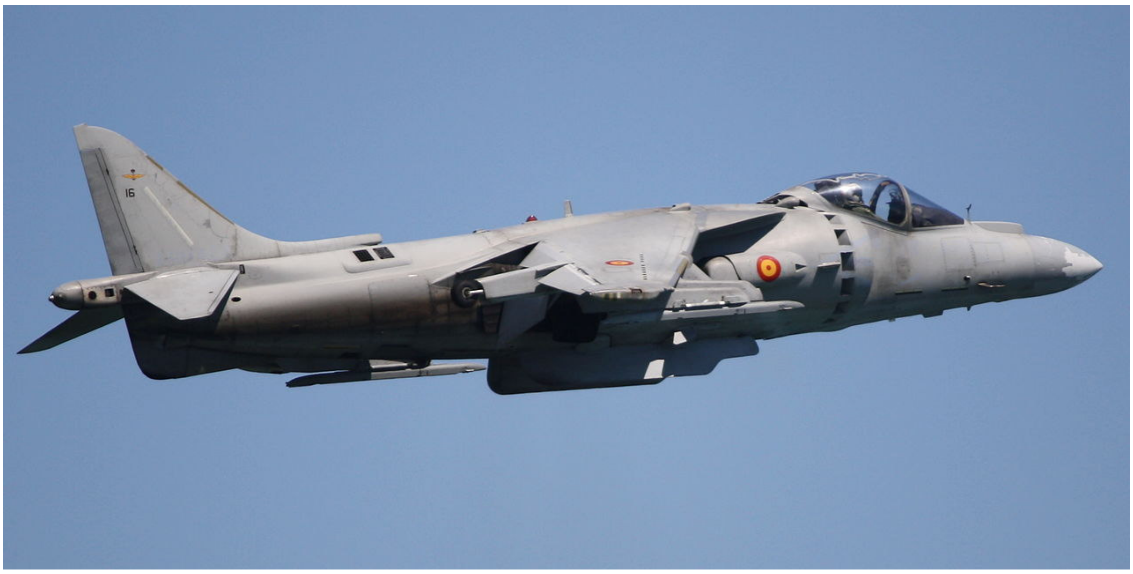
- Se deberá entregar el código fuente utilizado para la realización del trabajo.

Trabajo 1:
Funciones de Transferencia Open Loop Aviones
MUIA (2021/22)
FCS

3 Datos

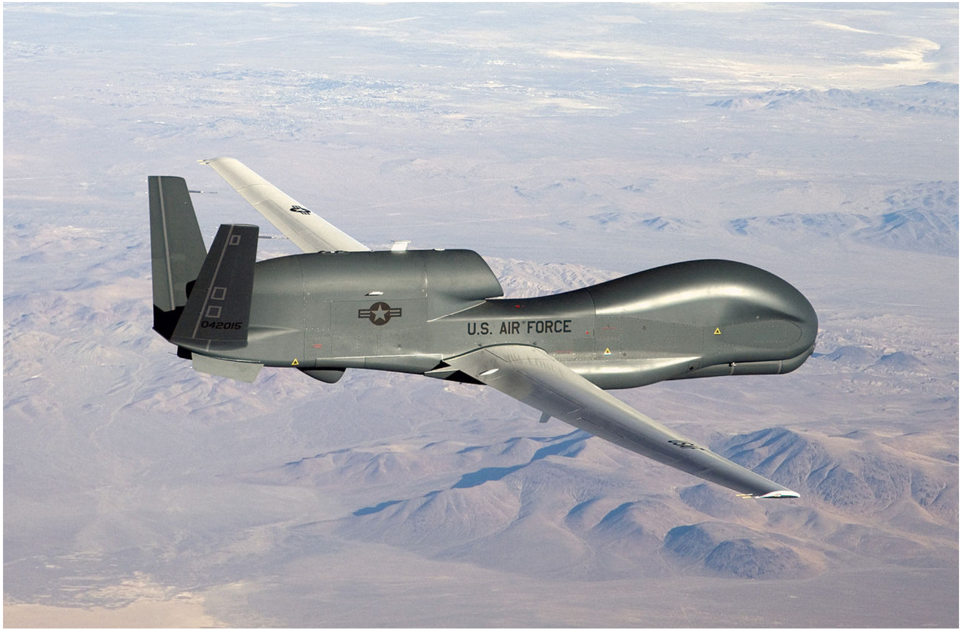
AVIÓN COMBATE: YAV-8B Harrier

Fuente:
TFM Simulador Vuelo
Rebeca Carrero Martínez
Curso 2019/20



Fuente:
TFM Simulador Vuelo
María Rodríguez Montes
Curso 2015/16

3 Datos
UAV: RQ-4A Global Hawk



De U.S. Air Force photo by Bobbi Zapka - http://www.af.mil/shared/media/photodb/photos/070301-F-9126Z-229.jpg, Dominio público, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6711631