

Trabajo 2: Sistemas de Aumento de Estabilidad y Autopilotos

1 DESCRIPCIÓN

1.1 Características Generales

- 1.1.1 Actuadores
- 1.1.2 Sensores
- 1.1.3 Márgenes de Estabilidad

1.2 SAS Longitudinal

- 1.2.1 Objetivo
- 1.2.2 Análisis de Sensibilidad de la Planta Libre (Planta sin Aumentar)
- 1.2.3 Respuesta Temporal del Sistema Sin Aumentar
- 1.2.4 Diseño del SAS
- 1.2.5 Análisis de Robustez del Diseño frente a Tolerancias Aerodinámicas

1.3 SAS Lateral-Direccional

- 1.3.1 Objetivo
- 1.3.2 Análisis de Sensibilidad de la Planta Libre (Planta sin Aumentar)
- 1.3.3 Respuesta Temporal del Sistema Sin Aumentar
- 1.3.4 Diseño del SAS
- 1.3.5 Diseño del Washout

1.4 AP Longitudinal

1.5 AP Lateral-Direccional

2 ENTREGABLES

3 ANEXOS

1 Descripción

1.1 Características Generales

- Cada grupo FCS_21_XX deberá diseñar **1 Sistema de Aumento de Estabilidad y 1 Autopiloto** para el Avión que les fue asignado en el Trabajo 1 “Funciones de Transferencia Open Loop de Aviones”
- El diseño del SAS y del AP se deberá realizar con las funciones de transferencia completas obtenidas a partir del modelo completo de 3gdl:
 - Canal Longitudinal: $\{\Delta u(t), \Delta \alpha(t), \Delta \theta(t), \Delta q(t)\}$
 - Canal Lateral-Direccional: $\{\Delta \beta(t), \Delta p(t), \Delta r(t), \Delta \phi(t)\}$

1.1.1 Actuadores

Se elegirá uno de los siguientes actuadores y se caracterizará mediante su función de transferencia:

- ❖ Actuador ideal
- ❖ Actuador real:
 - ✓ Función de transferencia dada por el fabricante de actuadores para sistemas de control de vuelo de aviones.
- ❖ Actuador definido a partir de requerimientos de control:
 - ✓ Sistema de Primer Orden: Ancho de banda
 - ✓ Sistema de Segundo Orden: Ancho de banda y Pico de resonancia máximo

Se puntuará positivamente la representatividad del actuador seleccionado.

1 Descripción

1.1 Características Generales

1.1.2 Sensores

Se elegirá uno de los siguientes sensores y se caracterizará mediante su función de transferencia:

- ❖ Sensor ideal
- ❖ Sensor real:
 - ✓ Función de transferencia obtenida a partir del tiempo de retardo dado por el fabricante.
- ❖ Sensor definido a partir de requerimientos de control:
 - ✓ Tiempo de retardo: Se utilizará una aproximación de Padé de orden N (suficientemente grande), tal que su desfase sea representativo del desfase introducido por un retardo puro (e^{-ts}) en el rango de frecuencias de control.

Se puntuará positivamente la representatividad del sensor seleccionado.

1.1.3 Márgenes de Estabilidad

- ❖ Caso Nominal:
 - ✓ Margen de Ganancia: 6 dB.
 - ✓ Margen de Fase: 45°.
- ❖ Análisis de Robustez frente a Tolerancias Aerodinámicas:
 - ✓ Margen de Ganancia: 4.5 dB.
 - ✓ Margen de Fase: 30°

1 Descripción

1.2 SAS Longitudinal

1.2.1 Objetivo

- El objetivo es diseñar un SAS que **mejore** las características dinámicas del modo de Corto Período.
- Se definirá un valor de frecuencia y amortiguamiento para el modo aumentado de corto período que deberá ser conseguido mediante el SAS.
- Se analizará el efecto de este SAS sobre la respuesta temporal del avión frente a una deflexión del mando de cabeceo.
- Se realizará un análisis de robustez frente a variaciones en la potencia de mando, rigidez y amortiguamiento aerodinámico.

1.2.2 Análisis de Sensibilidad de la Planta Libre (Planta sin Aumentar)

Se realizará un análisis de sensibilidad de los modos longitudinales frente a variaciones en las siguientes derivadas de estabilidad:

- ❖ $C_{m\dot{q}}$: Amortiguamiento en cabeceo
- ❖ $C_{m\alpha}$: Índice de estabilidad estática longitudinal con mandos fijos (frente a perturbaciones en el ángulo de ataque y factor de carga uno).

Se realizará un barrido adecuado en los factores multiplicativos para ver la variación en la frecuencia y amortiguamiento del modo de corto período.

$$[C_{m\dot{q}}]_{\text{target}} = F_{\dot{q}} [C_{m\dot{q}}]_{\text{free-plant}} ; [C_{m\alpha}]_{\text{target}} = F_{\alpha} [C_{m\alpha}]_{\text{free-plant}}$$

Se dibujará el contorno de las raíces de la ecuación característica frente a variaciones simultáneas en ambas derivadas de estabilidad.

1 Descripción

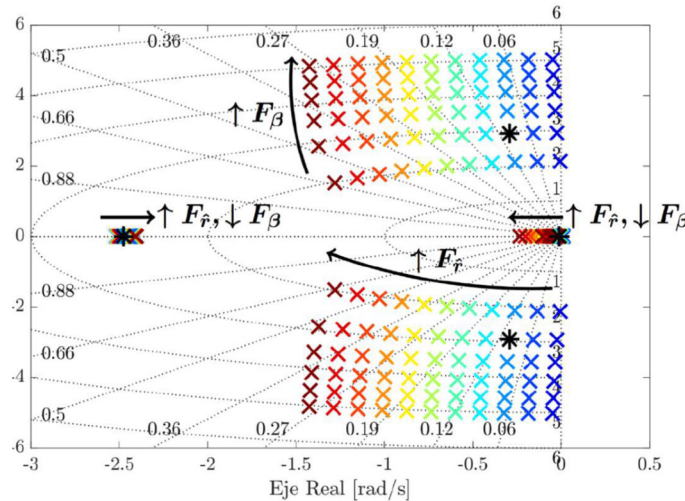
1.2 SAS Longitudinal

1.2.2 Análisis de Sensibilidad de la Planta Libre (Planta sin Aumentar)

Se realizará un barrido adecuado en los factores de multiplicidad para ver la variación en la frecuencia y amortiguamiento del modo de corto período.

$$[C_{m\dot{q}}]_{\text{target}} = F_{\dot{q}} [C_{m\dot{q}}]_{\text{free-plant}} ; [C_{m\alpha}]_{\text{target}} = F_{\alpha} [C_{m\alpha}]_{\text{free-plant}}$$

Se dibujará el contorno de las raíces de la ecuación característica frente a variaciones simultáneas en ambas derivadas de estabilidad.



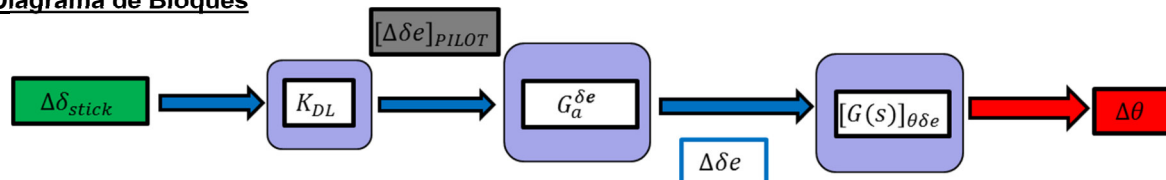
1 Descripción

1.2 SAS Longitudinal

1.2.3 Respuesta Temporal del Sistema Sin Aumentar (KDL + Actuador + TFOI δe a θ)

Para este apartado (1.2.3) se utilizará el modelo longitudinal completo.

Diagrama de Bloques



Selección de la Ganancia de Direct-Link

- Se calculará de forma **analítica** la ganancia de Direct-Link que relaciona la deflexión del mando de cabeceo ($\Delta\delta_{\text{stick}}$) con la deflexión del timón de profundidad demandada por el piloto ($(\Delta\delta_e)_{\text{PILOT}}$).

$$K_{DL} = \frac{(\Delta\delta_e)_{\text{PILOT}}}{\Delta\delta_{\text{stick}}}$$

- Se seleccionará una ganancia de Direct-Link que proporcione un incremento de ángulo de asiento de 1° por cada grado de deflexión del mando de cabeceo (salto escalón unitario \rightarrow respuesta estacionaria)

Respuesta Temporal

- Se representará la evolución de las variables de estado longitudinales frente al tiempo ante una deflexión del mando de cabeceo tipo rampa saturada de 1° de amplitud y un rate de $5^\circ/\text{s}$.
- Se calculará el Time Delay y el Rise Time para la respuesta en ángulo de asiento del sistema sin aumentar.

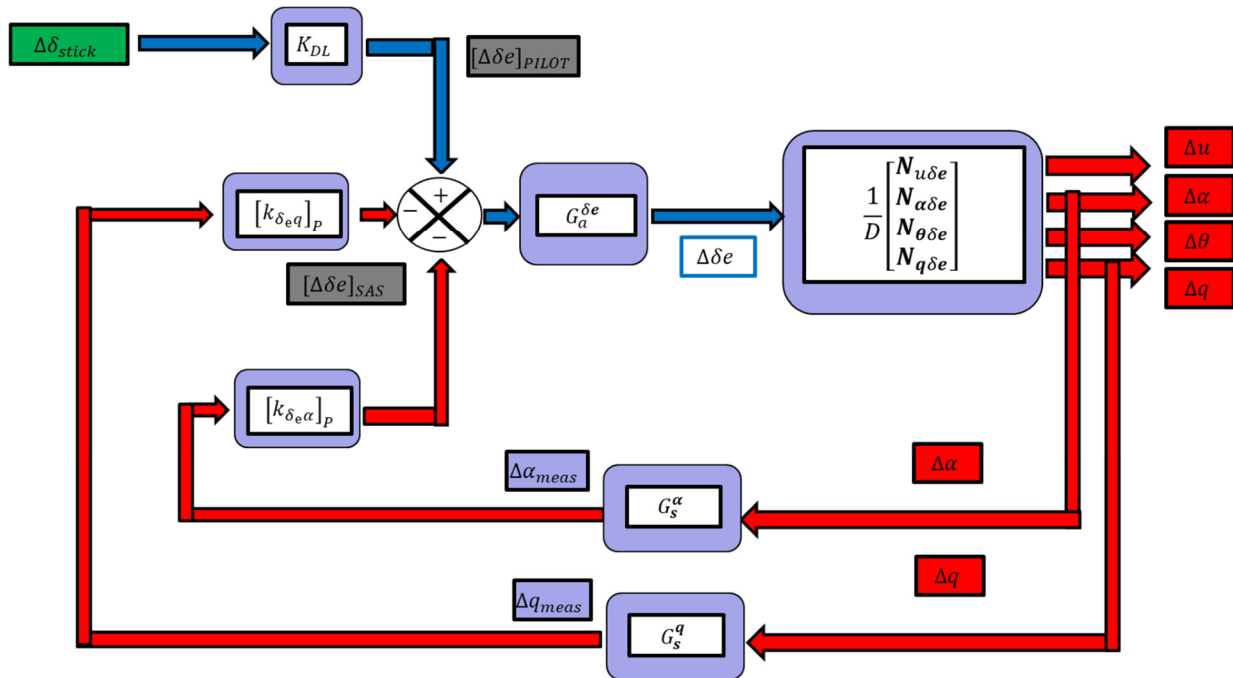
1 Descripción

1.2 SAS Longitudinal

1.2.4 Diseño SAS

Diagrama de Bloques

- Se deberá utilizar la función de transferencia completa con sus 3 gdl para el canal longitudinal.



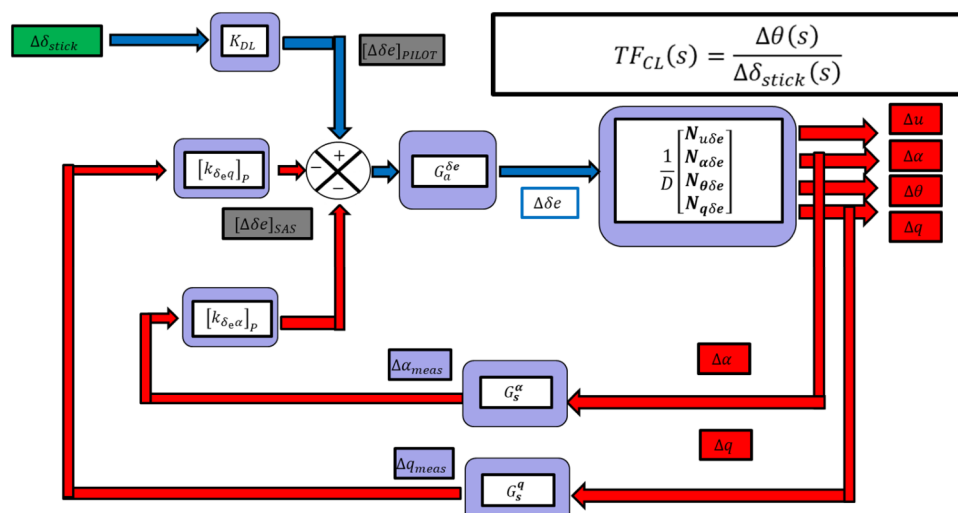
1 Descripción

1.2 SAS Longitudinal

1.2.4 Diseño SAS

- Se calcularán de forma **analítica** las funciones de transferencia en lazo cerrado del sistema:

$$\frac{\Delta u(s)}{\Delta \delta_s(s)}, \frac{\Delta \alpha(s)}{\Delta \delta_s(s)}, \frac{\Delta \theta(s)}{\Delta \delta_s(s)}, \frac{\Delta q(s)}{\Delta \delta_s(s)}$$
- A partir de las funciones de transferencia en lazo cerrado, se identificará la función en transferencia en lazo abierto del sistema: $TF_{CL}(s) = \frac{F(s)}{1+TF_{OL}(s)}$
- Para la formulación matemática del problema se deberá mantener la nomenclatura del diagrama de bloques para cada función de transferencia, variable de estado y control, salida del sistema, etc...



1 Descripción

1.2 SAS Longitudinal

1.2.4 Diseño SAS

$$[k_{\delta_{e\alpha}}]_P = -(F_\alpha - 1) \frac{C_{m_\alpha}}{C_{m_{\delta_e}}}$$

$$[k_{\delta_{eq}}]_P = -(F_{\hat{q}} - 1) \frac{C_{m_{\hat{q}}}}{C_{m_{\delta_e}}} \frac{c}{2u_s}$$

Barrido de Ganancias de Realimentación

- Se seleccionará un set de ganancias de realimentación $\{[k_{\delta_{eq}}]_P, [k_{\delta_{e\alpha}}]_P\}$ tales que proporcionen los mismos incrementos en la derivada de estabilidad correspondiente que los ya fijados para el análisis de sensibilidad de la planta libre: $[k_{\delta_{eq}}]_P \rightarrow F_{\hat{q}} ; [k_{\delta_{e\alpha}}]_P \rightarrow F_\alpha$
- Se dibujará el contorno de las raíces para el set de ganancias de realimentación $\{[k_{\delta_{eq}}]_P, [k_{\delta_{e\alpha}}]_P\}$ seleccionado.
- Se comparará el contorno de las raíces del sistema real frente al obtenido en el análisis de sensibilidad de la planta libre.
- Se dibujará el diagrama de Nichols para este set de ganancias y se obtendrán los **márgenes de estabilidad dentro de un rango de frecuencias $\omega \gg \omega_p$**
 - Si el modo fugoide es inestable los márgenes de estabilidad a baja frecuencia serán negativos.
- A partir del contorno de las raíces y del diagrama de Nichols se **seleccionarán unas ganancias de realimentación adecuadas.**

Respuesta Temporal

- Se representará la evolución de las variables de estado longitudinales frente al tiempo ante una deflexión del mando de cabeceo tipo rampa saturada de 1° de amplitud y a un rate de 5°/s.
- Se calculará el Time Delay y el Rise Time para la respuesta en ángulo de asiento.
- Se analizará la influencia de la frecuencia y amortiguamiento del modo aumentado de corto período sobre los parámetros de Time Delay y Rise Time.

1 Descripción

1.2 SAS Longitudinal

1.2.5 Análisis de Robustez del Diseño frente a Tolerancias Aerodinámicas

- Una vez seleccionados los valores de las ganancias de realimentación, se realizará un análisis de robustez de este diseño frente a variaciones en las siguientes derivadas de estabilidad:
 - $C_{m_{\hat{q}}}$: Damping.
 - C_{m_α} : Stiffness
 - $C_{m_{\delta_e}}$: Control Power
- Se considerarán los siguientes incrementos en las derivadas de estabilidad frente al caso nominal:
 - $\pm 20\% C_{m_{\hat{q}}}$
 - $\pm 20\% C_{m_\alpha}$
 - $\pm 20\% C_{m_{\delta_e}}$
- Se representará el lugar de las raíces para cada uno de los tres casos anteriores en un único diagrama junto con el caso nominal.
- Se representará el diagrama de Nichols para cada uno de los tres casos anteriores en un único diagrama junto con el caso nominal.
- Se analizará la influencia de las variaciones de estas derivadas de estabilidad sobre las características de los modos aumentados y sobre los márgenes de estabilidad.
- En caso de incumplimiento de los márgenes de estabilidad, se deberán reducir las ganancias de realimentación adecuadamente.

1 Descripción

1.3 SAS Lateral-Direccional

1.3.1 Objetivo

- El objetivo es diseñar un SAS que **mejore** las características dinámicas del modo Dutch-Roll.
- Se definirá un valor de frecuencia y amortiguamiento para el modo aumentado de Dutch-Roll que deberá ser conseguido mediante el SAS.
- Se analizará el efecto de este SAS sobre la respuesta temporal del avión frente a una deflexión del mando de alabeo.

1.3.2 Análisis de Sensibilidad de la Planta Libre (Planta sin Aumentar)

Realizar un análisis de sensibilidad de los modos lateral-direccionales frente a variaciones en las siguientes derivadas de estabilidad:

- ❖ $C_{n\dot{\varphi}}$: Amortiguamiento en guiñada
- ❖ $C_{n\beta}$: Índice de estabilidad estática direccional con mandos libres (frente a variaciones en el ángulo de resbalamiento).

Se realizará un barrido adecuado en los factores multiplicativos para ver la variación en la frecuencia y amortiguamiento del modo de dutch-roll.

$$[C_{n\dot{\varphi}}]_{\text{target}} = F_{\dot{\varphi}} [C_{n\dot{\varphi}}]_{\text{free-plant}} ; [C_{n\beta}]_{\text{target}} = F_{\beta} [C_{n\beta}]_{\text{free-plant}}$$

Se dibujará el contorno de las raíces de la ecuación característica frente a variaciones simultáneas en ambas derivadas de estabilidad.

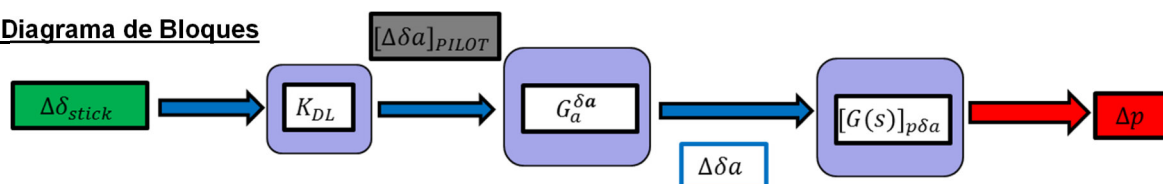
1 Descripción

1.3 SAS Lateral-Direccional

1.3.3 Respuesta Temporal del Sistema Sin Aumentar (KDL + Actuador + TFol de δa a p)

En el apartado 1.3.3 se utilizará el modelo simplificado de 1gdl del modo de convergencia en balance.

Diagrama de Bloques



Selección de la Ganancia de Direct-Link

- Se calculará de forma **analítica** la ganancia de Direct-Link que relaciona la deflexión del mando de alabeo ($\Delta\delta_{\text{stick}}$) con la deflexión de los alerones demandada por el piloto ($(\Delta\delta_a)_{\text{PILOT}}$): $K_{DL} = \frac{(\Delta\delta_a)_{\text{PILOT}}}{\Delta\delta_{\text{stick}}}$
- Se calculará la velocidad angular de balance estacionaria frente a una entrada salto escalón unitario en deflexión de alerones. Se seleccionará una ganancia de Direct-Link que proporcione una velocidad angular de balance estacionaria igual a 1°/s por cada grado de deflexión del mando de alabeo.

Respuesta Temporal

- Se representará la evolución de las variables de estado lateral-direccional frente al tiempo ante una deflexión del mando de alabeo. La ley temporal de deflexión del mando será un salto escalón mantenido durante un tiempo suficiente como para permitir alcanzar un ángulo de balance estacionario de 15°. Una vez alcanzado dicho valor, se anulará instantáneamente la deflexión del mando de alabeo.
- Se calculará el Time Delay y el Rise Time para la respuesta en ángulo de balance del sistema sin aumentar.

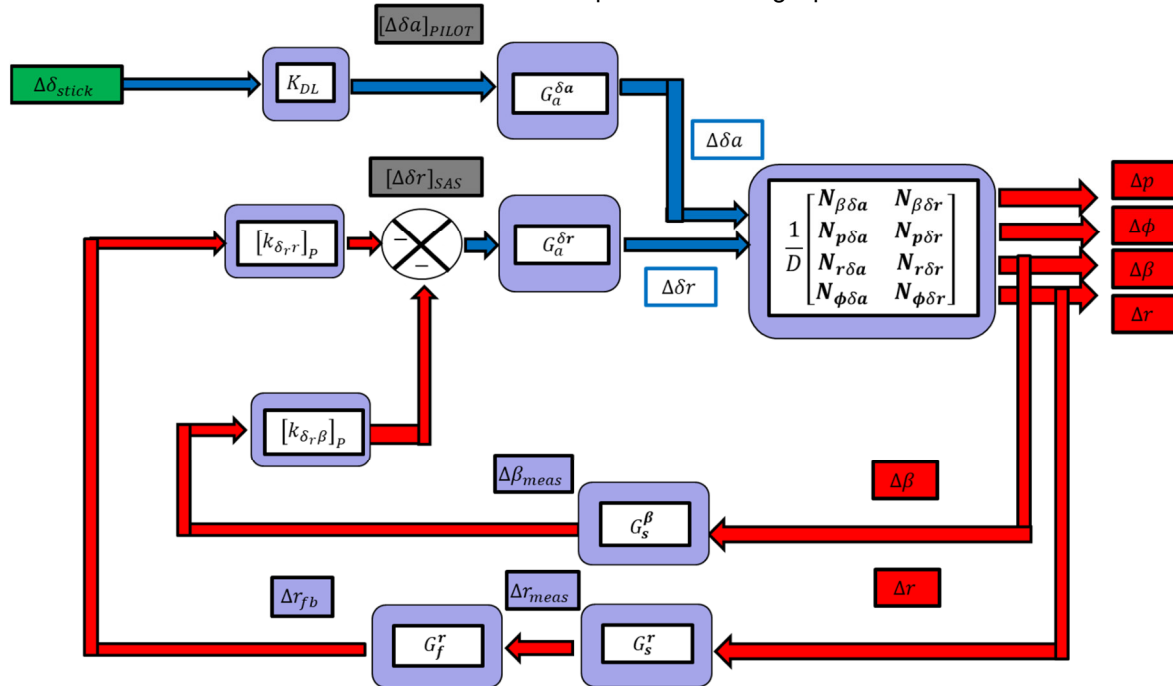
1 Descripción

1.3 SAS Lateral-Direccional

1.3.4 Diseño SAS

Diagrama de Bloques

- Se deberá utilizar la función de transferencia completa con sus 3 gdl para el canal lateral-direccional.



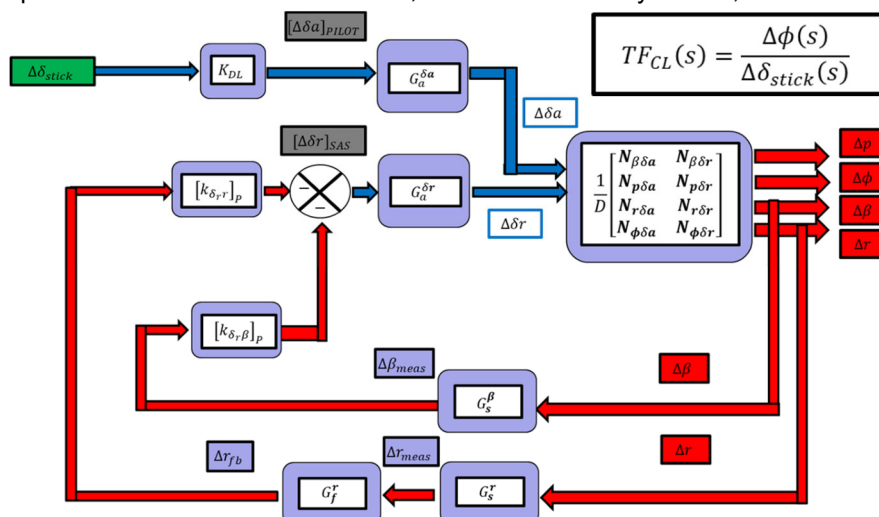
1 Descripción

1.3 SAS Lateral-Direccional

1.3.4 Diseño SAS

- Se calcularán de forma **analítica** las funciones de transferencia en lazo cerrado del sistema:

$$\frac{\Delta\beta(s)}{\Delta\delta_s(s)}, \frac{\Delta\phi(s)}{\Delta\delta_s(s)}, \frac{\Delta p(s)}{\Delta\delta_s(s)}, \frac{\Delta r(s)}{\Delta\delta_s(s)}$$
- A partir de las funciones de transferencia en lazo cerrado, se identificará la función en transferencia en lazo abierto del sistema: $TF_{CL}(s) = \frac{F(s)}{1+TF_{OL}(s)}$
- Para la formulación matemática del problema se deberá mantener la nomenclatura del diagrama de bloques para cada función de transferencia, variable de estado y control, salida del sistema, etc...



1 Descripción

1.3 SAS Lateral-Direccional

1.3.4 Diseño SAS

$$\begin{aligned} [k_{\delta_r \beta}]_p &= -(F_\beta - 1) \frac{C_{n_\beta}}{C_{n_{\delta_r}}} \\ [k_{\delta_r r}]_p &= -(F_{\hat{r}} - 1) \frac{C_{n_{\hat{r}}}}{C_{n_{\delta_r}}} \frac{b}{2u_s} \end{aligned}$$

Barrido de Ganancias de Realimentación

- Se seleccionará un set de ganancias de realimentación $\{[k_{\delta_r r}]_p, [k_{\delta_r \beta}]_p\}$ tales que proporcionen los mismos incrementos en la derivada de estabilidad correspondiente que los ya fijados para el análisis de sensibilidad de la planta libre: $[k_{\delta_r r}]_p \rightarrow F_{\hat{r}} \quad [k_{\delta_r \beta}]_p \rightarrow F_\beta$
- Se dibujará el contorno de las raíces para el set de ganancias de realimentación $\{[k_{\delta_r r}]_p, [k_{\delta_r \beta}]_p\}$ seleccionado.
- Se comparará el contorno de las raíces obtenido para el sistema real frente al obtenido en el análisis de sensibilidad de la planta libre.
- Se dibujará el diagrama de Nichols para el set de ganancias y se obtendrán los **márgenes de estabilidad dentro de un rango de frecuencias $\omega \gg 1/\tau_s$**
 - Si el modo espiral es inestable los márgenes de estabilidad a baja frecuencia serán negativos.
- A partir del contorno de las raíces y del diagrama de Nichols se seleccionarán unas ganancias de realimentación adecuadas.

1 Descripción

1.3 SAS Lateral-Direccional

1.3.5 Diseño WashOut

- Para las ganancias de realimentación seleccionadas, se realizará un análisis de sensibilidad de la variación de los modos aumentados del avión y de la variación de la respuesta del avión en balance frente a variaciones en la frecuencia de corte del washout.
- Para ello se seleccionaran tres valores de la frecuencia de corte del washout:
 - $w_{wo} \ll w_{DR}$
 - $w_{wo} \cong w_{DR}$
 - $w_{wo} \gg w_{DR}$
- Para cada uno de estos tres filtros:
 - Se representará el contorno de las raíces y el diagrama de Nichols
 - Se representará la respuesta del avión a la ley temporal de deflexión del mando de alabeo definida para el caso del sistema sin aumentar
 - Se calculará el Time Delay y el Rise Time para la respuesta en ángulo de balance.
 - Se analizará la influencia de la frecuencia del modo aumentado de convergencia en balance sobre los parámetros de Time Delay y Rise Time. Se compararán estos resultados con los ya obtenidos para el sistema sin aumentar.

1 Descripción

1.4 AP Longitudinal

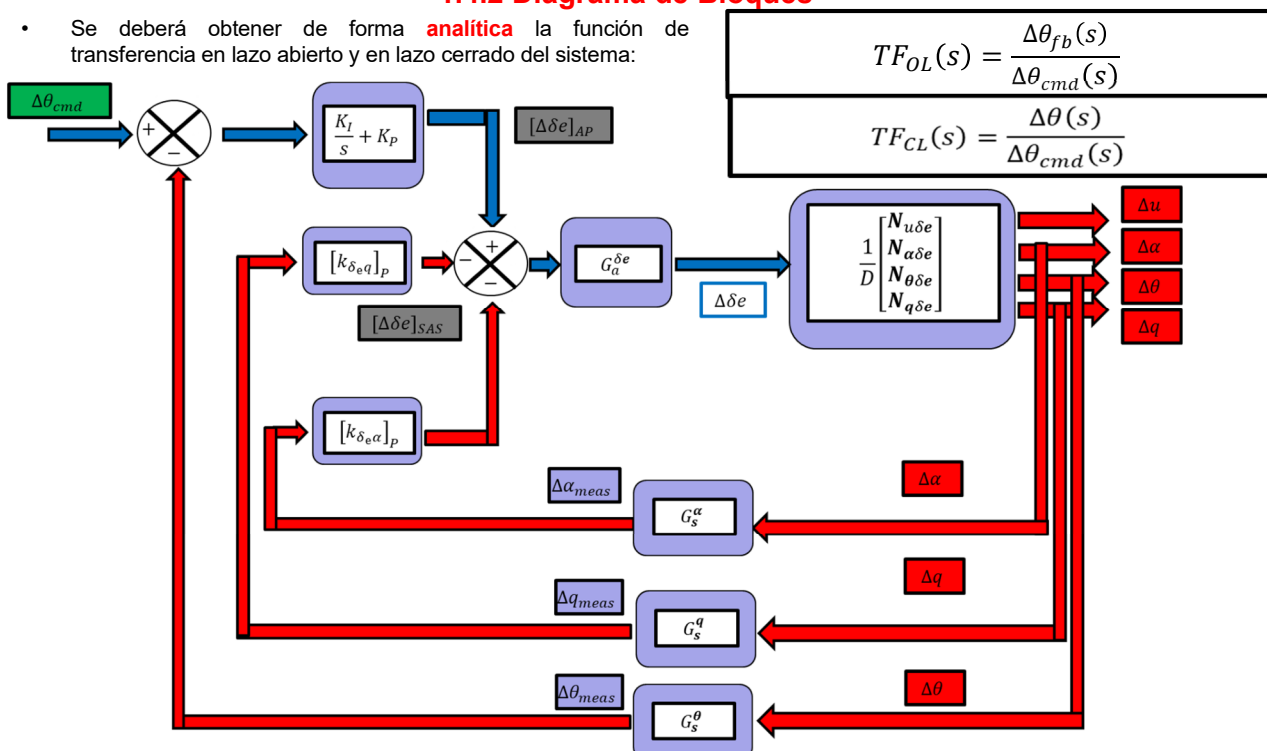
1.4.1 Objetivo

- El objetivo es diseñar un AP para el control del ángulo de asiento del avión.
- Se debe partir del SAS Longitudinal previamente diseñado.
- El AP debe incluir al menos una ganancia de realimentación integral y una ganancia de realimentación proporcional $\{[k_{\delta_e\theta}]_I, [k_{\delta_e\theta}]_P\}$.
- Se elegirán como criterios de diseño 2 de los siguientes parámetros:
 - ✓ Amortiguamiento mínimo del Modo Fugoide Aumentado.
 - ✓ Time Delay máximo, Rise Time máximo, Tiempo de Asentamiento máximo.
- Se valorará positivamente un diseño del AP que incluya:
 - ✓ Barrido de ganancias de realimentación $\{[k_{\delta_e\theta}]_I, [k_{\delta_e\theta}]_P\}$
 - Contorno de las raíces de la función de transferencia en lazo cerrado $\frac{\Delta\theta(s)}{\Delta\theta_{cmd}(s)}$
 - Diagrama de Nichols de la función de transferencia en lazo abierto $\frac{\Delta\theta_{fb}(s)}{\Delta\theta_{cmd}(s)}$
 - ✓ Selección de unas ganancias de realimentación tales que se cumplan los márgenes de estabilidad
 - ✓ ...

1 Descripción

1.4 AP Longitudinal 1.4.2 Diagrama de Bloques

- Se deberá obtener de forma **analítica** la función de transferencia en lazo abierto y en lazo cerrado del sistema:



1 Descripción

1.4 AP Longitudinal

1.4.3 Actuaciones del Autopiloto

Respuesta Temporal

- Se representará la evolución del ángulo de asiento del avión frente a un comando del ángulo de asiento $\Delta\theta_{cmd}$ tipo rampa a un rate de 5°/s y saturada a 1°.
- Se calculará el Time Delay y el Rise Time para la respuesta en ángulo de asiento y se compararán estos resultados con los obtenidos sin el Autopiloto (Avión sin SAS y Avión con SAS).
- Se valorará positivamente la representación gráfica de la evolución temporal del resto de variables del canal longitudinal.

1 Descripción

1.5 AP Lateral-Direccional

1.5.1 Objetivo

- El objetivo es diseñar un AP para el control del ángulo de balance del avión.
- Se debe partir del SAS Lateral-Direccional previamente diseñado.
- El AP debe incluir al menos una ganancia de realimentación proporcional $\{[k_{\delta_a\phi}]_p\}$.
- Se elegirá como criterio de diseño alguno de los siguientes parámetros:
 - ✓ Time Delay máximo, Rise Time máximo, Tiempo de Asentamiento máximo.
- Se valorará positivamente un diseño del AP que incluya:
 - ✓ Barrido de ganancias de realimentación $\{[k_{\delta_a\phi}]_p\}$
 - Lugar de las raíces de la función de transferencia en lazo cerrado $\frac{\Delta\phi(s)}{\Delta\phi_{cmd}(s)}$
 - Diagrama de Nichols de la función de transferencia en lazo abierto $\frac{\Delta\phi_{fb}(s)}{\Delta\phi_{cmd}(s)}$
 - ✓ Selección de una ganancia de realimentación tal que cumpla los márgenes de estabilidad
 - ✓

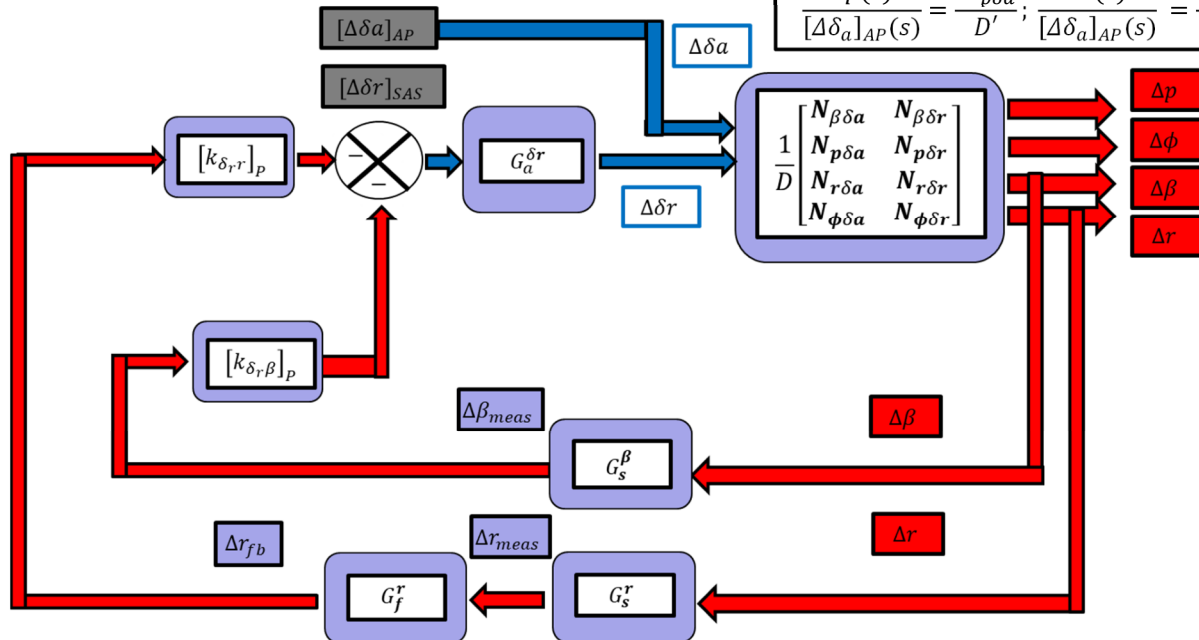
1 Descripción

1.5 AP Lateral-Direccional

1.5.2 Diagrama de Bloques

- Se calcularán de forma **analítica** las funciones de transferencia en lazo cerrado del siguiente sistema:

$$\begin{array}{l} \frac{\Delta\beta(s)}{[\Delta\delta_a]_{AP}(s)} = \frac{N'_{\beta\delta a}}{D'}; \quad \frac{\Delta\phi(s)}{[\Delta\delta_a]_{AP}(s)} = \frac{N'_{\phi\delta a}}{D'} \\ \frac{\Delta p(s)}{[\Delta\delta_a]_{AP}(s)} = \frac{N'_{p\delta a}}{D'}; \quad \frac{\Delta r(s)}{[\Delta\delta_a]_{AP}(s)} = \frac{N'_{r\delta a}}{D'} \end{array}$$



1 Descripción

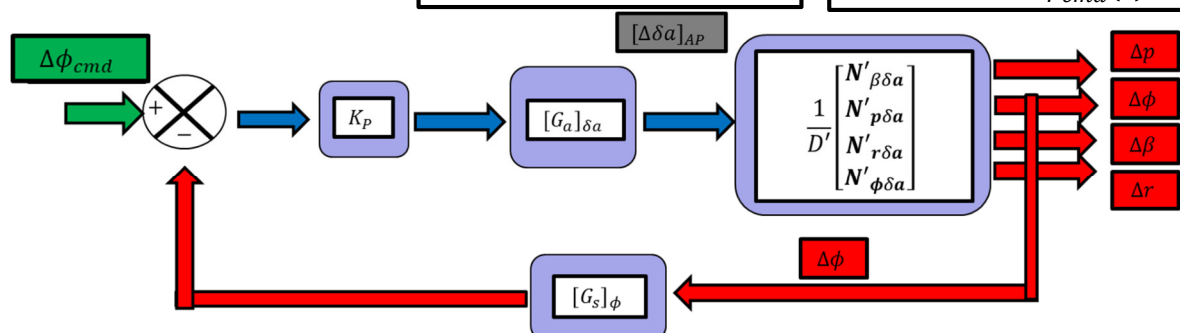
1.5 AP Lateral-Direccional

1.5.2 Diagrama de Bloques

- Se deberá obtener de forma **analítica** la función de transferencia en lazo abierto y en lazo cerrado del sistema:

$$TF_{OL}(s) = \frac{\Delta\phi_{fb}(s)}{\Delta\phi_{cmd}(s)}$$

$$TF_{CL}(s) = \frac{\Delta\phi(s)}{\Delta\phi_{cmd}(s)}$$



Respuesta Temporal

1.5.3 Actuaciones del Autopiloto

- Se representará la evolución del ángulo de balance del avión frente a un comando del ángulo de balance $\Delta\phi_{cmd}$ tipo rampa saturada a 15° y a un rate de $1^\circ/s$.
- Se calculará el Time Delay y el Rise Time para la respuesta en ángulo de balance y se compararán estos resultados con los obtenidos sin el Autopiloto (Avión sin SAS y Avión con SAS).
- Se valorará positivamente la representación gráfica de la evolución temporal del resto de variables del canal [lateral-direccional].

2 Entregables

- Cada grupo deberá diseñar **1 Sistema de Aumento de Estabilidad y 1 Autopiloto** para el Avión que les fue asignado en el Trabajo 1 “Funciones de Transferencia Open Loop de Aviones”

→ **ENTREGABLES**

- FCS02_21_XX_Description.pdf:
 - ✓ Documento en formato PDF con la descripción y los resultados del diseño del SAS y del AP
- FCS02_21_XX_Presentation:
 - ✓ Presentación en formato PowerPoint o PDF con un resumen del diseño/resultados del SAS y del AP.
 - ✓ Cada grupo deberá exponer esta presentación en un máximo de 15 minutos. Todos los integrantes del grupo deberán intervenir en la exposición.
- FCS02_21_XX_Code:
 - ✓ Todos los ficheros utilizados para el diseño del SAS/AP deberán agruparse en una carpeta con el nombre FCS02_21_XX_Codigo

→ **FECHA DE ENTREGA Y PUBLICACIÓN DE CALIFICACIONES**

- Todos los entregables se deben comprimir en un único .zip con el nombre FCS02_20_XX, siendo XX el grupo asignado, y se enviarán a las siguientes direcciones de correo electrónico bajo el asunto FCS02_21_XX antes del Sábado 11 de Diciembre de 2021.

miguelangel.gomez@upm.es

manuel.perez@upm.es

- El tamaño máximo no deberá exceder los 5MB