

Estudio de características Aerodinámicas y de Estabilidad de un Ala Voladora

Trabajo Fin de Grado

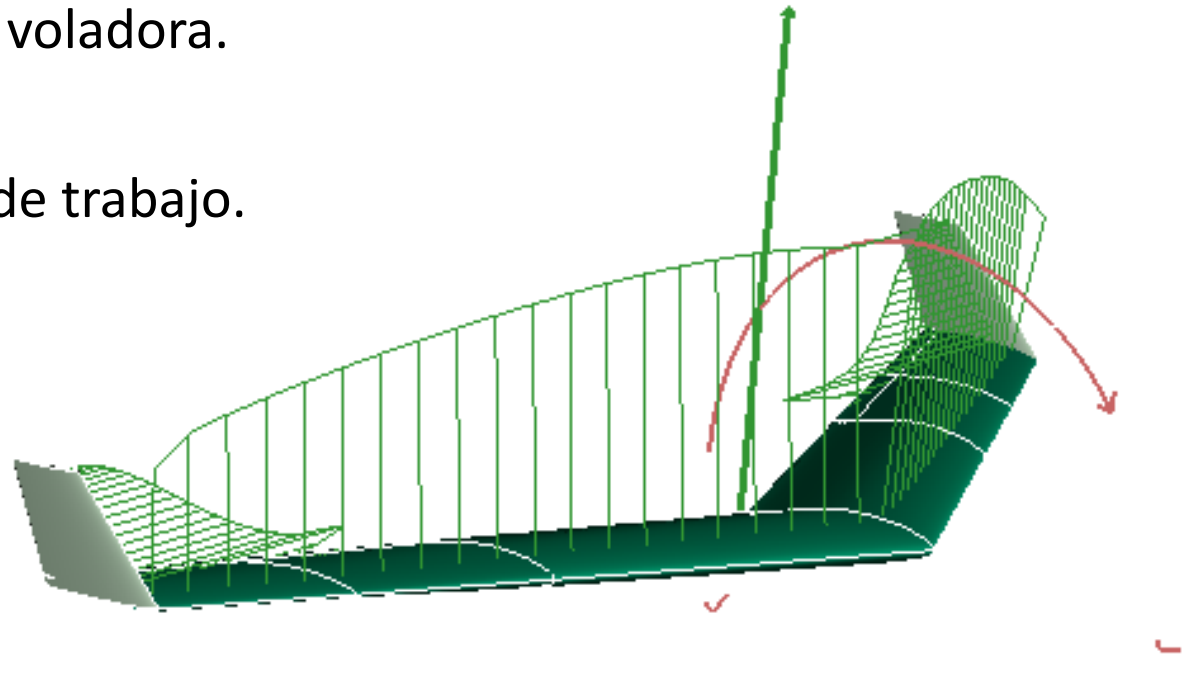
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Jorge Narbona González

Tutor: Sergio Esteban Roncero

Índice general

- **Descripción del proyecto.**
- Análisis del ala voladora.
- Conclusiones.
- Futuras líneas de trabajo.



Descripción del proyecto

- Motivación:

- Desarrollo de un código de análisis para alas voladoras.
- Dificultad en la estabilidad de las alas voladoras.

- Antecedentes: Ala Voladora (*“Static and Dynamic Analysis of an Unconventional Plane: Flying Wing”*).

- Objetivos:

- Corroborar los resultados previos. Comprobar la necesidad de los winglets.
- Comparación de resultados mediante distintas herramientas de cálculo.
- Validación del software XFLR5 → sentar las bases para un futuro estudio en túnel de viento.

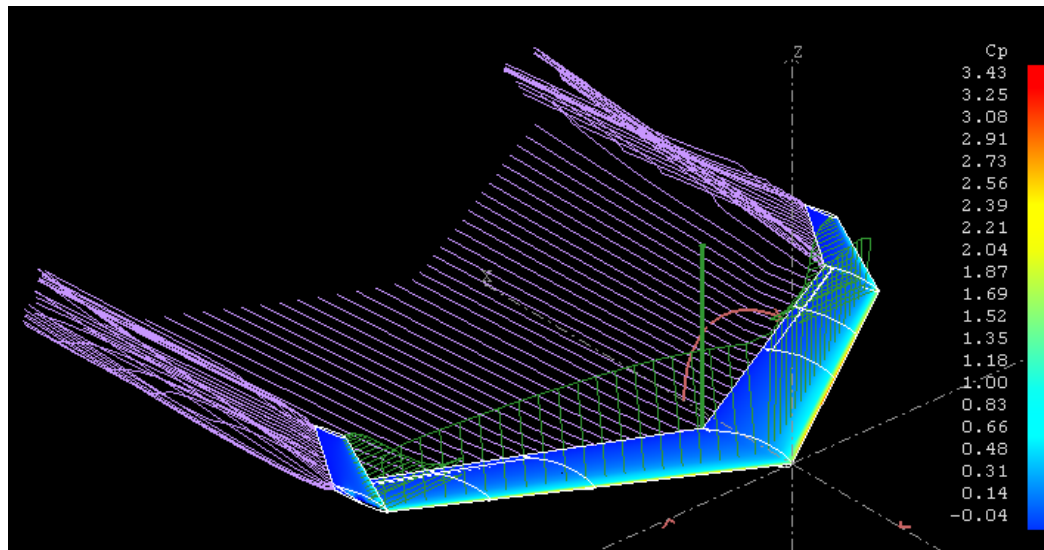


Índice general

- Descripción del proyecto.
- **Análisis del ala voladora:**
 - Geometría nominal.
 - Estudios de aerodinámica.
 - Estudios de estabilidad.
- Conclusiones.
- Futuras líneas de trabajo.

Análisis del Ala Voladora

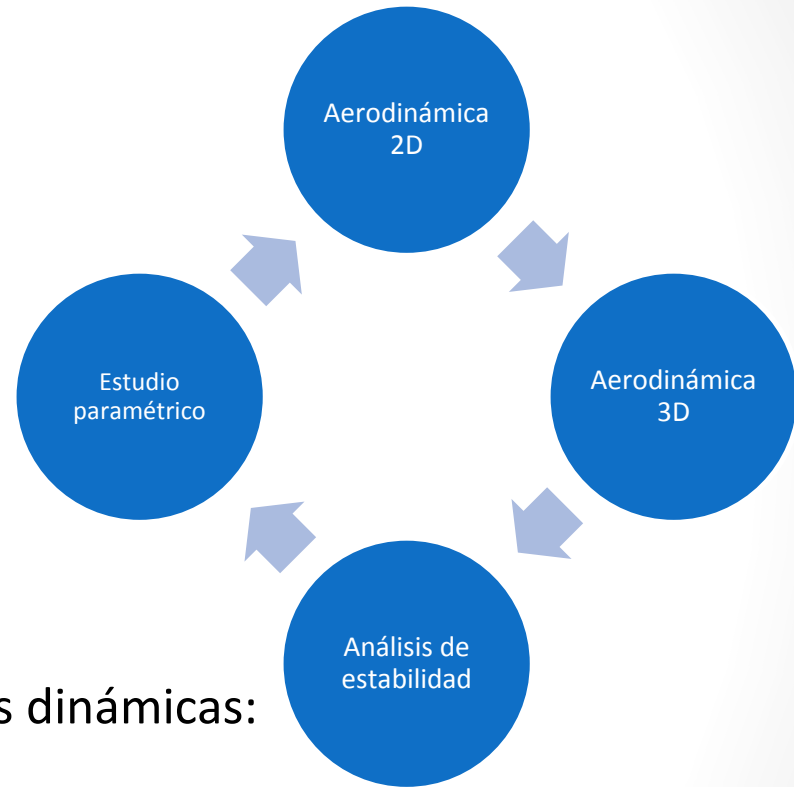
- Procedimiento de cálculo: XFLR5



- Software libre.
- Permite realizar análisis aerodinámicos de perfiles y aviones operando a bajos números de Reynolds.
- Basado en XFOIL.
- Incluye un módulo de estabilidad.

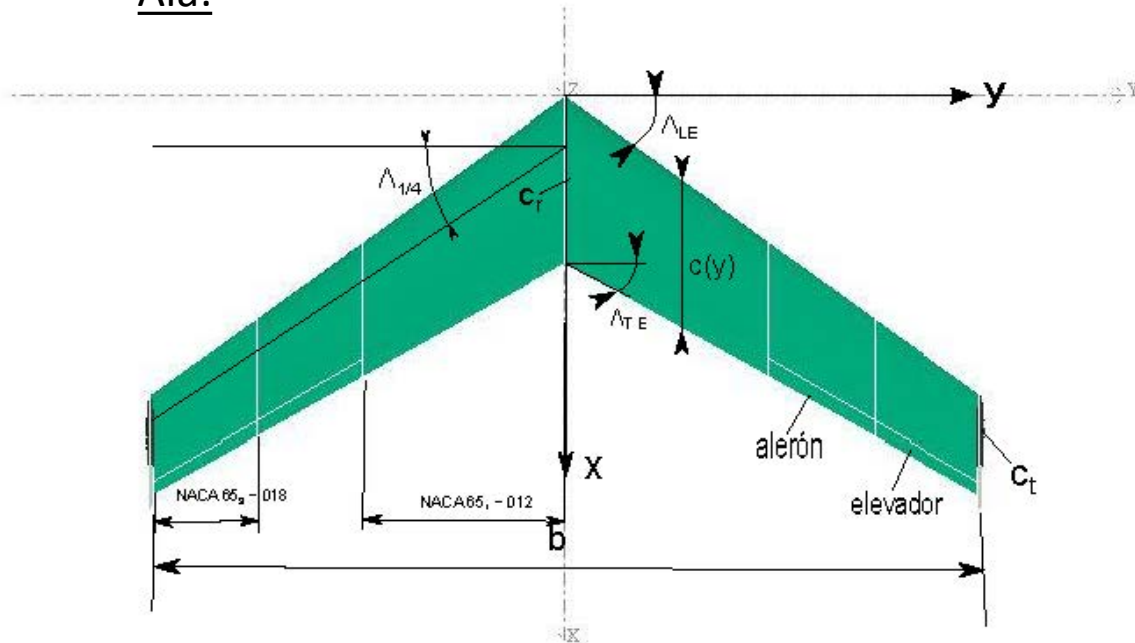
Análisis del Ala Voladora

- Geometría nominal.
- Análisis de aerodinámica:
 - Estudios 2D.
 - Estudios 3D:
 - Ala sin winglets.
 - Ala con winglets.
- Análisis de estabilidad:
 - Derivadas de estabilidad.
 - Estudio paramétrico y respuestas dinámicas:
 - Flecha del ala.
 - Estrechamiento del ala.
 - Superficie de los winglets.

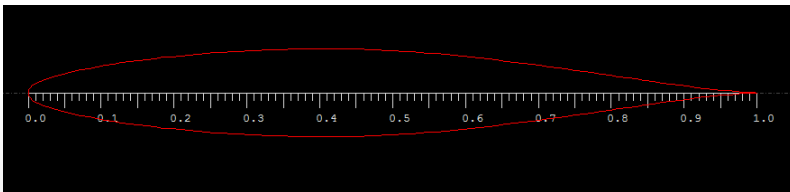


Geometría nominal

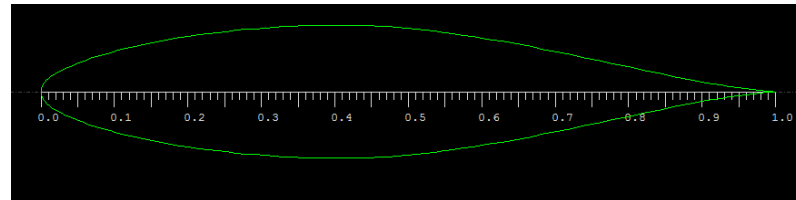
- Ala:



$$\begin{aligned}
 c_r &= 50,800 \text{ cm} \\
 b &= 2,438 \text{ m} \\
 \lambda &= 0,6 \\
 S &= 0,991 \text{ m}^2 \\
 A &= 6 \\
 \Lambda_{1/4} &= 35^\circ \\
 m &= 5,897 \text{ kg}
 \end{aligned}$$



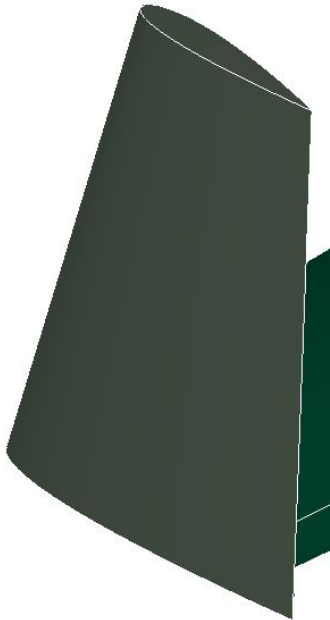
NACA 65₁ - 012



NACA 65₃ - 018

Geometría nominal

- Winglets:



NACA 0010

$$c_{r_v} = 30,480 \text{ cm}$$
$$\frac{b_v}{2} = 24,384 \text{ cm}$$
$$\lambda_v = 0,6$$
$$S_v = 0,119 \text{ m}^2$$
$$\Lambda_{LE_v} = 40^\circ$$

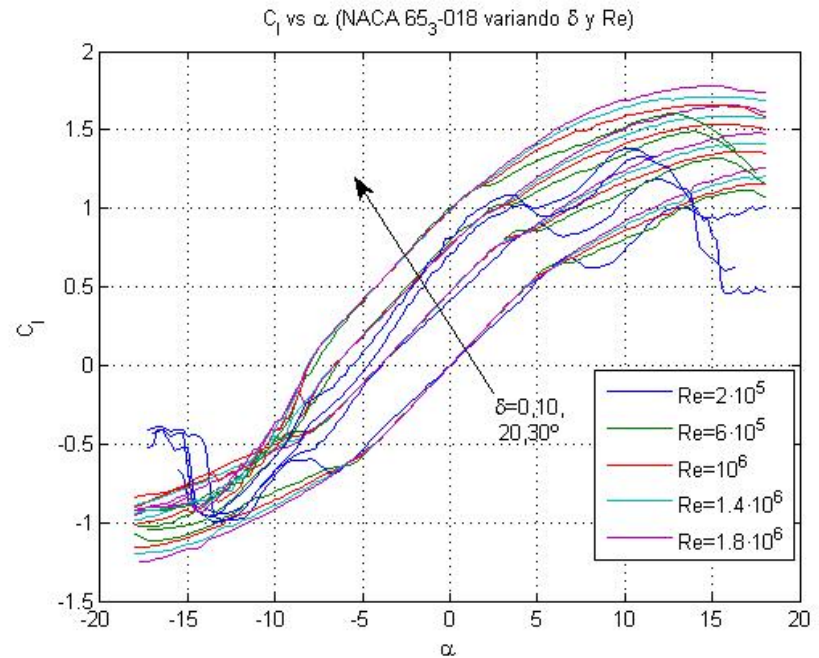
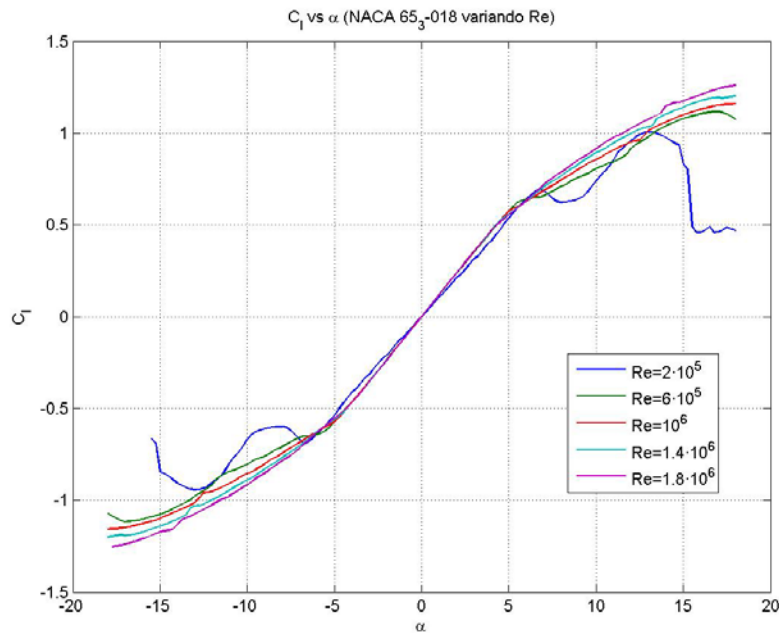

Análisis de Aerodinámica

- Análisis de aerodinámica:
 - **Estudios 2D.**
 - Estudios 3D:
 - Ala sin winglets.
 - Ala con winglets.

Análisis de aerodinámica

Estudios 2D

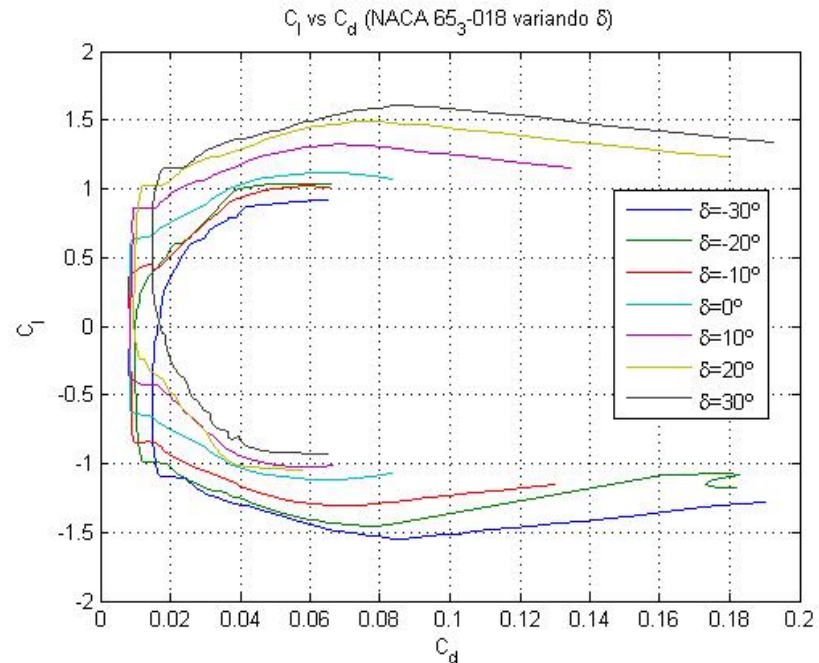
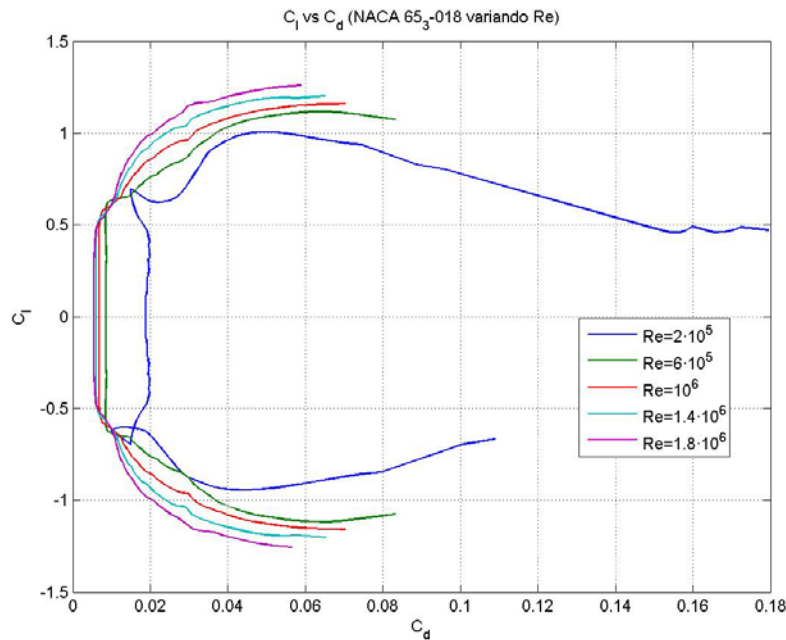
- NACA 65₃ - 018: C_l vs. α , δ , Re



Análisis de aerodinámica

Estudios 2D

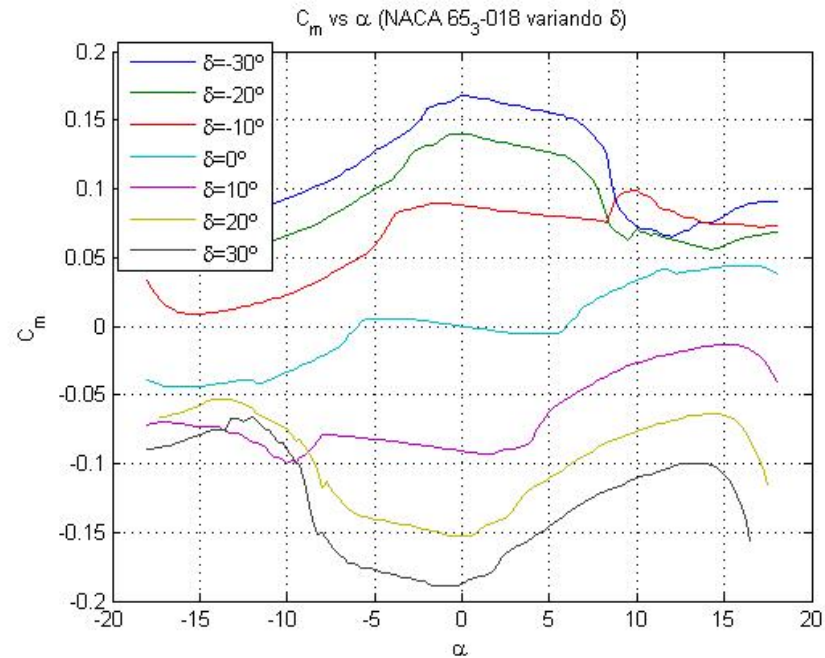
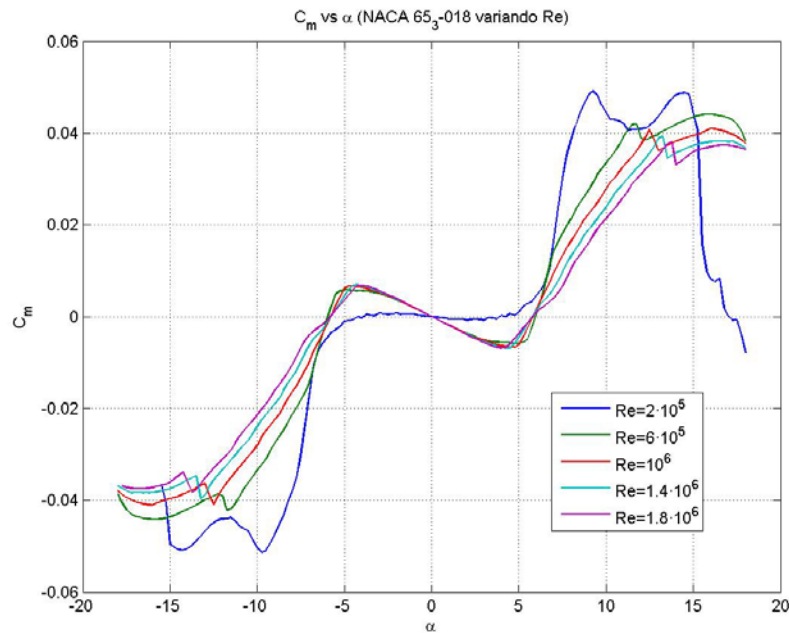
- NACA 65₃ – 018: C_l vs. C_d



Análisis de aerodinámica

Estudios 2D

- NACA 65₃ - 018: C_m vs. α , δ , Re



Análisis de Aerodinámica

- Análisis de aerodinámica:
 - Estudios 2D.
 - **Estudios 3D:**
 - Ala sin winglets.
 - Ala con winglets.

Análisis de aerodinámica

Estudios 3D

- Análisis de los coeficientes ($C_D, C_Y, C_L, C_l, C_m, C_n$) frente a $(\alpha, \delta_a, \delta_e, \delta_f, U_\infty, \beta)$

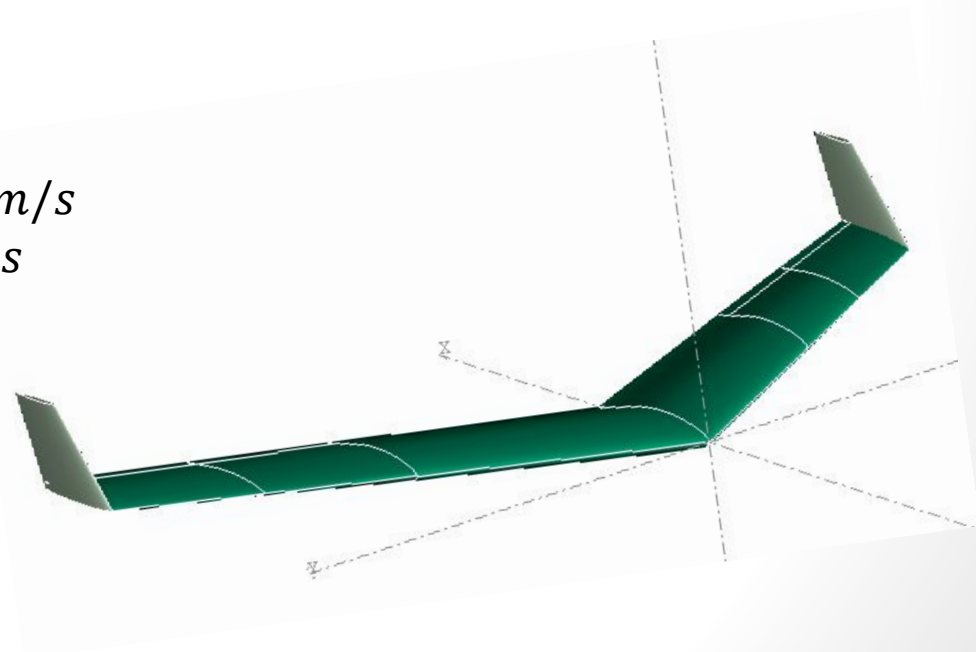
↳ Derivadas de estabilidad

- Ala sin winglets / con winglets
- VLM (XFLR5)
- Velocidades $\left\{ \begin{array}{l} V_1 = 14 \text{ m/s} \\ V_2 = 21,336 \text{ m/s} \\ V_3 = 44,5 \text{ m/s} \end{array} \right.$

- $SM \approx 10\%$

$$X_{NA} \approx 51,83 \text{ cm}$$

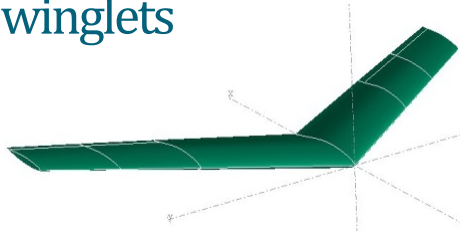
$$X_{CG} = 47,68 \text{ cm}$$



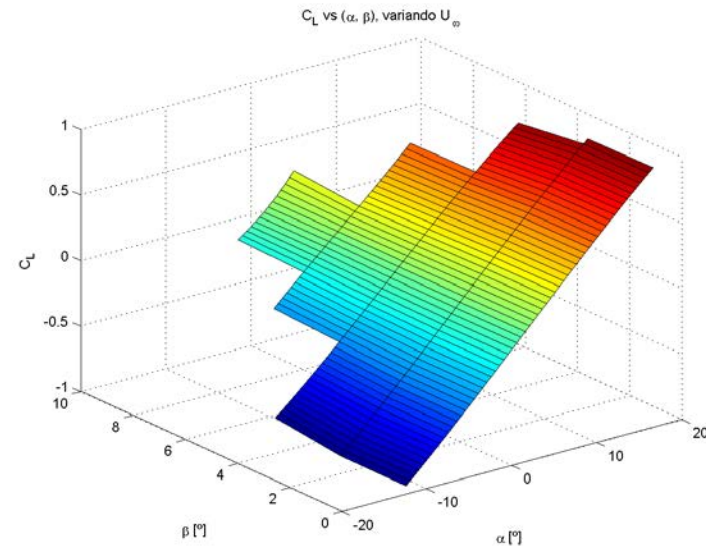
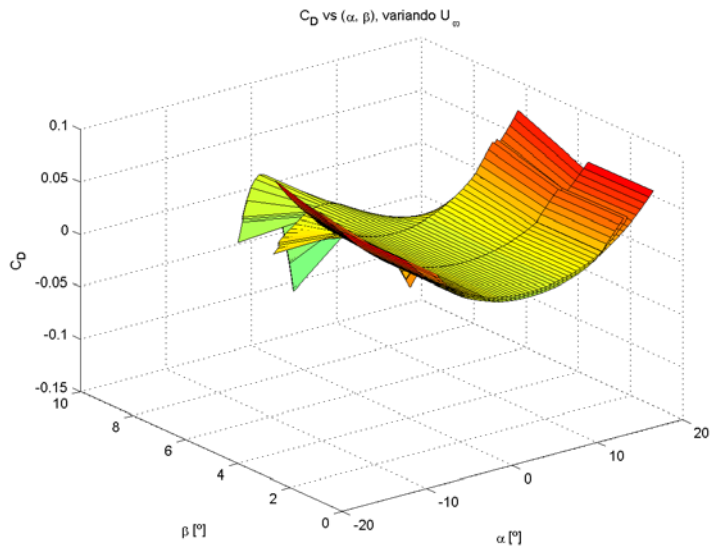
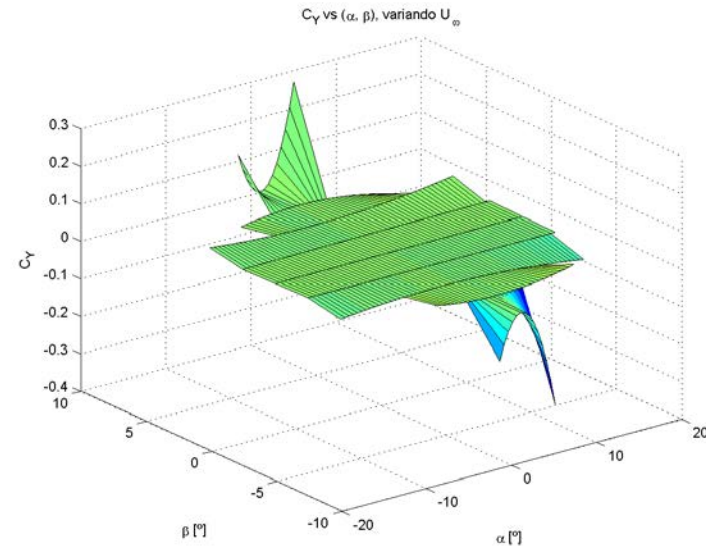
Análisis de aerodinámica

Estudios 3D

Ala sin winglets



- C_D, C_Y, C_L vs. α, β, U_∞

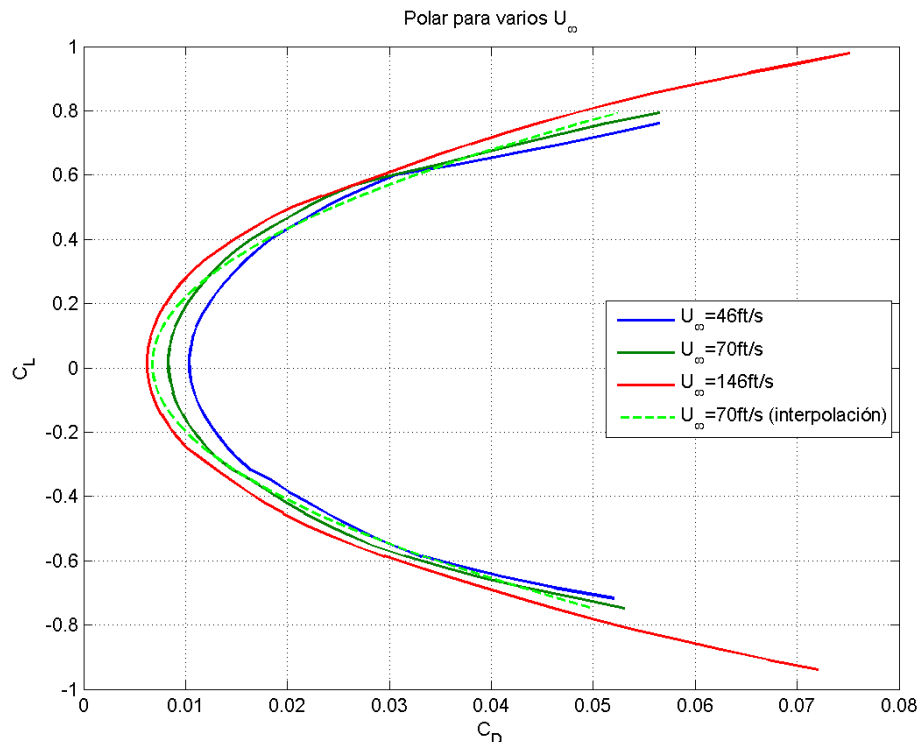


Análisis de aerodinámica

Estudios 3D

Ala sin winglets

- C_L vs. C_D (polar parabólica compensada)

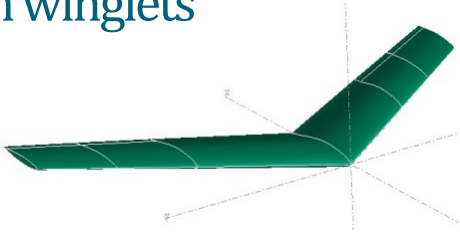


$$C_D \approx C_{D_0} + K_1 C_L + K_2 C_L^2$$
$$C_{D_0} = 0,00676$$
$$K_1 = -0,00177$$
$$K_2 = 0,07481$$

Análisis de aerodinámica

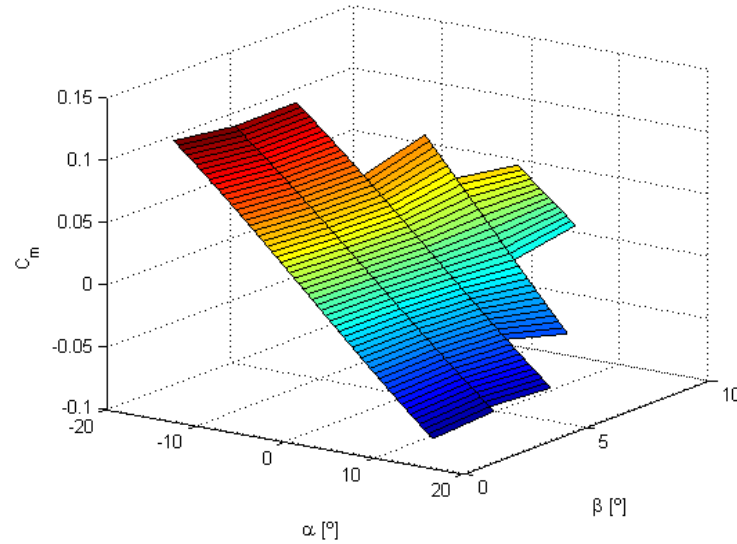
Estudios 3D

Ala sin winglets

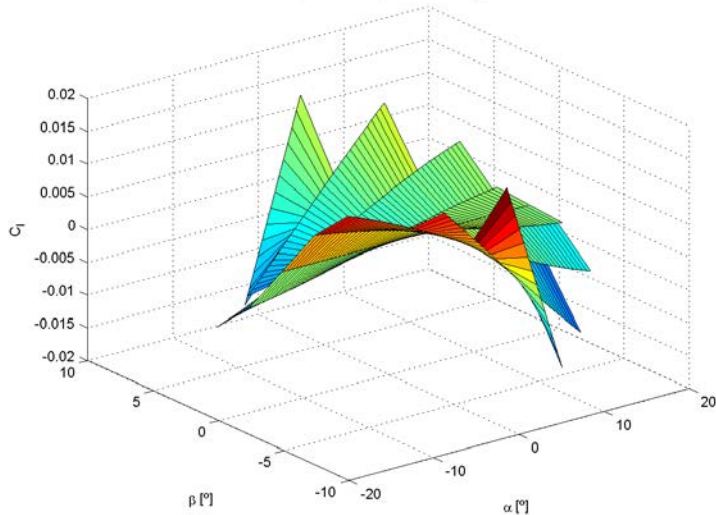


- C_l, C_m, C_n vs. α, β, U_∞

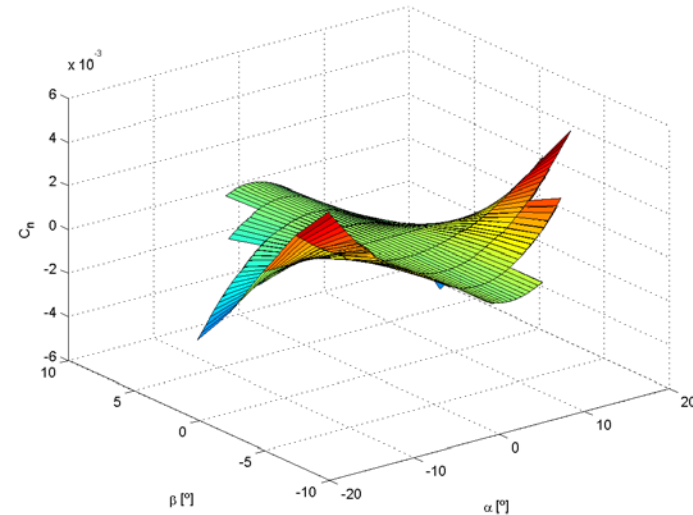
C_m vs (α, β), variando U_∞



C_l (roll) vs (α, β), variando U_∞



C_n (yaw) vs (α, β), variando U_∞



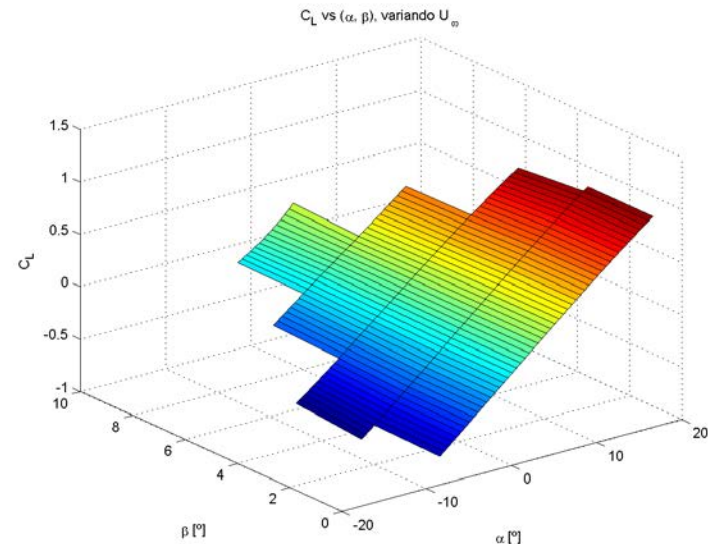
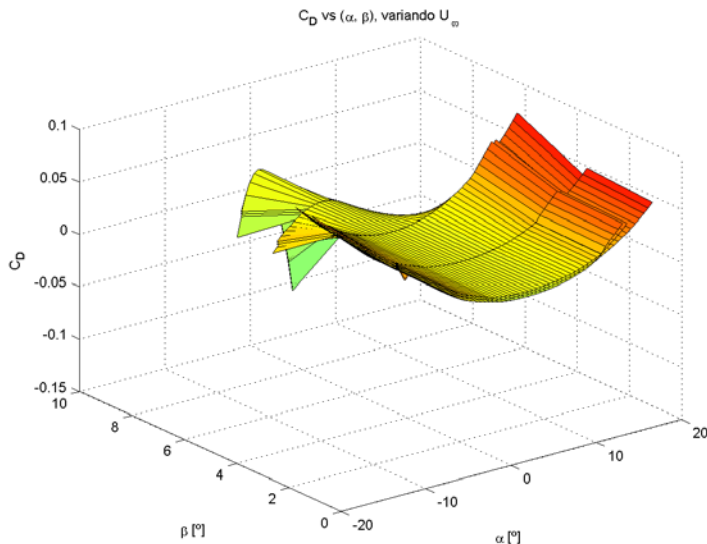
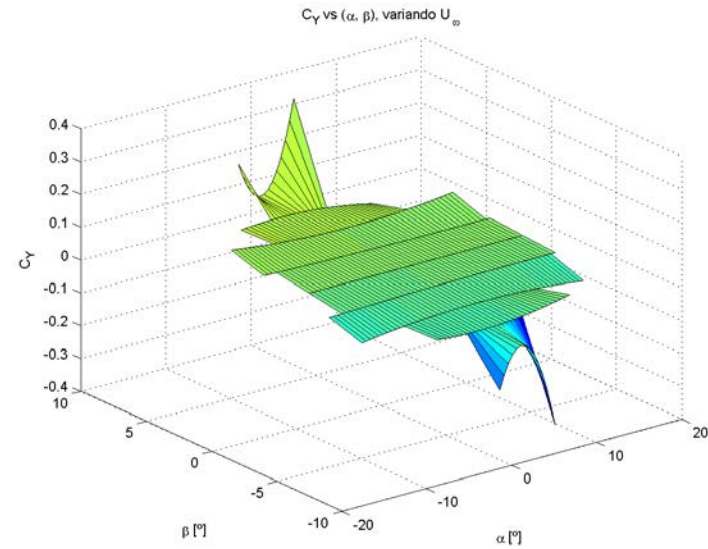
Análisis de aerodinámica

Estudios 3D

Ala con winglets



- C_D, C_Y, C_L vs. α, β, U_∞

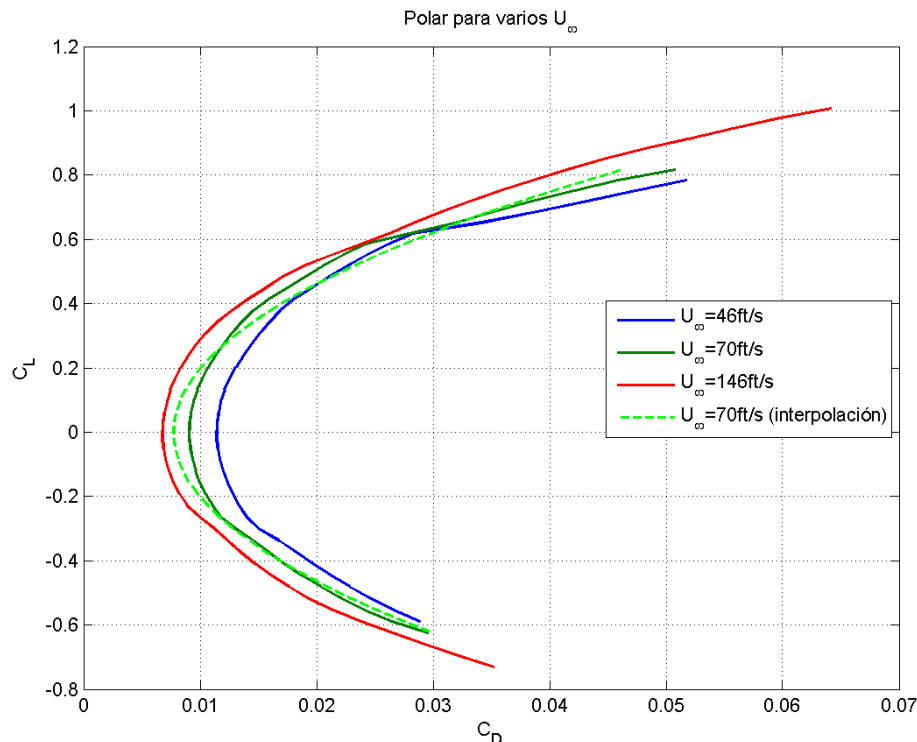


Análisis de aerodinámica

Estudios 3D

Ala con winglets

- C_L vs. C_D (polar parabólica compensada)



$$C_D \approx C_{D_0} + K_1 C_L + K_2 C_L^2$$
$$C_{D_0} = 0,00774$$
$$K_1 = 0,00015$$
$$K_2 = 0,05759$$

Análisis de aerodinámica

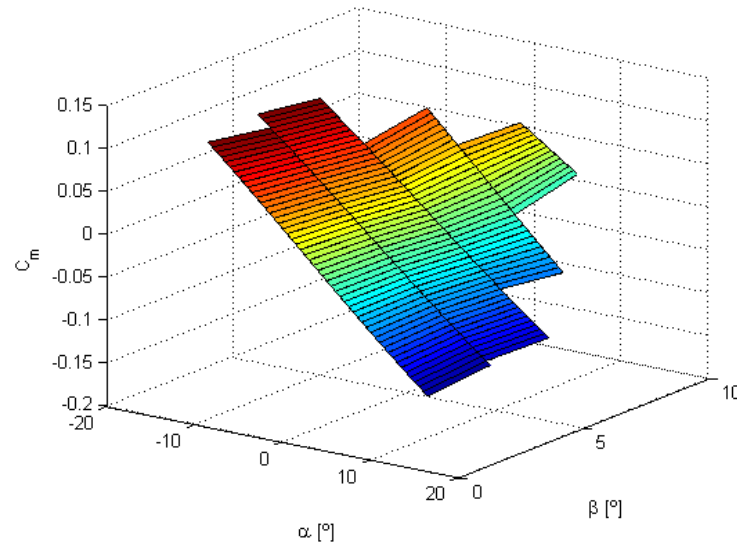
Estudios 3D

Ala con winglets

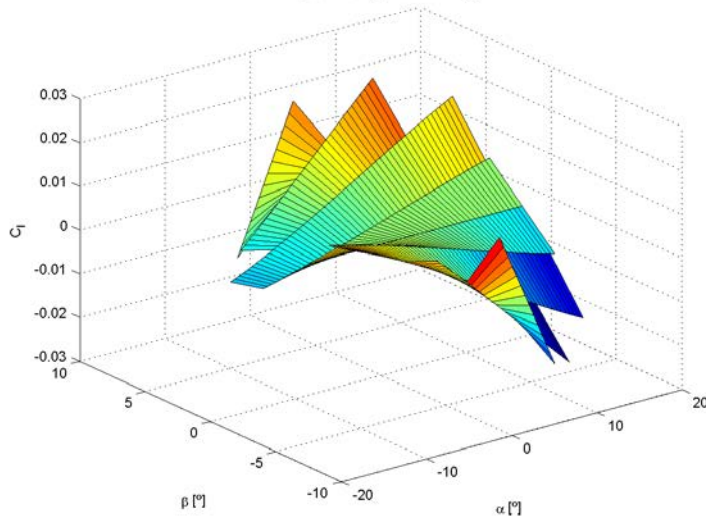


- C_l, C_m, C_n vs. α, β, U_∞

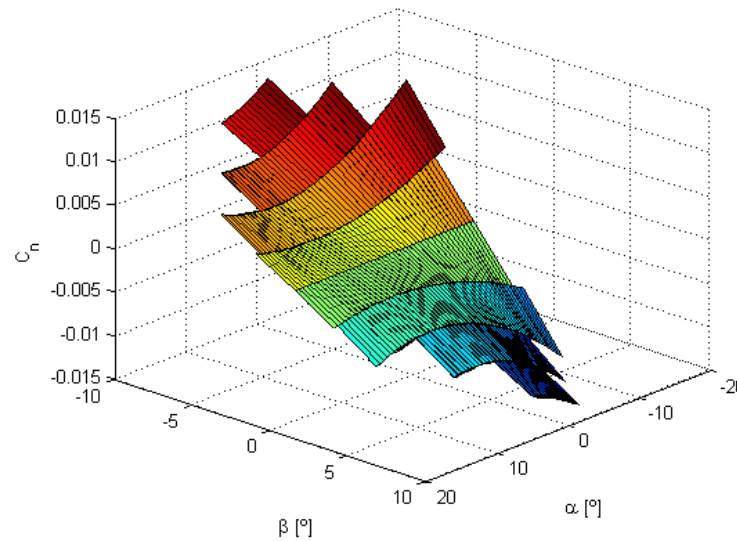
C_m vs (α, β), variando U_∞



C_l (roll) vs (α, β), variando U_∞



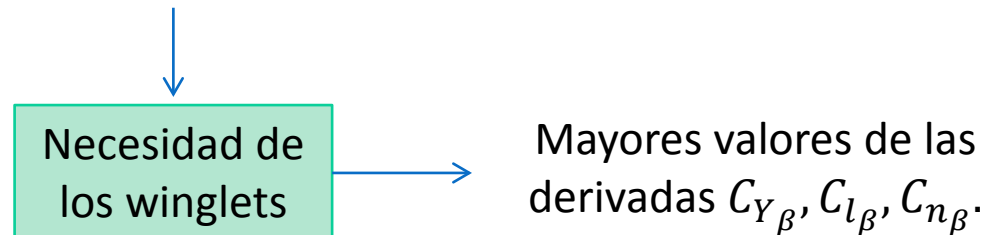
C_n (yaw) vs (α, β), variando U_∞



Análisis de aerodinámica

Estudios 3D

- Conclusiones:
 - Aerodinámica longitudinal similar en ambas configuraciones:
 - $C_{L\alpha} \uparrow$
 - $C_{D0} \uparrow, C_{Di} \downarrow$
 - $C_{m_0} \uparrow, |C_{m_\alpha}| \uparrow$
 - Aerodinámica lateral-direccional: algunas variables presentan unas tendencias irregulares y valores muy pequeños \rightarrow derivadas de estabilidad inestables .



Análisis de estabilidad

- Análisis de estabilidad:
 - **Derivadas de estabilidad.**
 - Estudio paramétrico y respuestas dinámicas:
 - Flecha del ala.
 - Estrechamiento del ala.
 - Superficie de los winglets.

Análisis de estabilidad

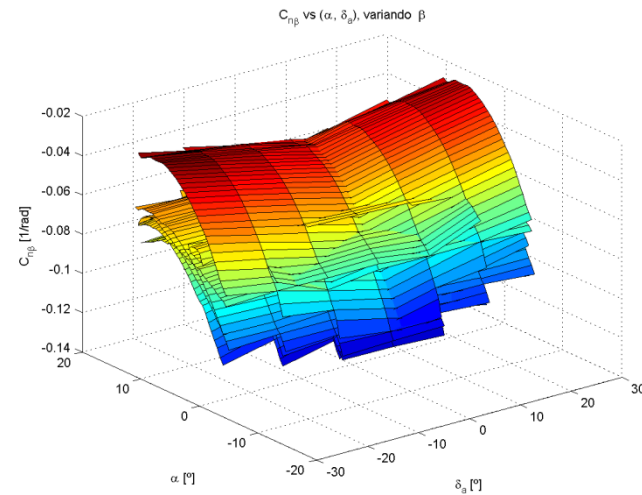
Derivadas de estabilidad

- Cálculo mediante distintos métodos:
 - XFLR5 (resultados aerodinámicos): código numérico.
 - XFLR5 (módulo de estabilidad).
 - Ecuaciones paramétricas : herramienta alternativa a XFLR5



Comparación y validación de los métodos.

- Las derivadas deben calcularse en una condición de vuelo de referencia → configuración de trimado.



$$C_{L\beta} = C_{L\beta,w} + C_{L\beta,v}$$
$$C_{L\beta,w} = C_{L1} \left(-k \frac{(0,71\lambda + 0,29)}{A\lambda} + 0,05 \right)$$
$$C_{L\beta,v} = -a_v \frac{S_v}{S} \frac{z_v}{b} \eta_v$$

Análisis de estabilidad

Derivadas de estabilidad

- Configuración de trimado:

Ala sin winglets

$$\begin{aligned}u_1 &\approx 21,336 \text{ m/s} \\ \alpha_1 &= 4,59^\circ \\ \delta_{e_1} &= 1,63^\circ \\ C_{L_0} &= -0,111 \\ C_{L_1} &= 0,2094 \\ C_{m_0} &= 0,0399 \\ C_{m_1} &= 0 \\ C_{D_1} &= 0,01039 \\ X_{NA} &= 52,07 \text{ cm} \\ X_{CP} &= 47,75 \text{ cm} \\ SM &= 10,59 \%\end{aligned}$$

Ala con winglets

$$\begin{aligned}u_1 &\approx 21,336 \text{ m/s} \\ \alpha_1 &= 4,58^\circ \\ \delta_{e_1} &= 0,36^\circ \\ C_{L_0} &= -0,120 \\ C_{L_1} &= 0,2095 \\ C_{m_0} &= 0,0481 \\ C_{m_1} &= 0 \\ C_{D_1} &= 0,01084 \\ X_{NA} &= 53,56 \text{ cm} \\ X_{CP} &= 47,82 \text{ cm} \\ SM &= 14,18 \%\end{aligned}$$

Análisis de estabilidad

Derivadas de estabilidad

- Derivadas longitudinales:

Ala sin winglets

$$\begin{aligned}C_{L\alpha} &= 3,9114 \text{ rad}^{-1} \\C_{D\alpha} &= 0,0875 \text{ rad}^{-1} \\C_{m\alpha} &= -0,4139 \text{ rad}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{L\delta_e} &= 0,2128 \text{ rad}^{-1} \\C_{D\delta_e} &\approx 0 \\C_{m\delta_e} &= -0,2321 \text{ rad}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{Lq} &= 3,7977 \text{ rad}^{-1} \\C_{Dq} &\approx 0 \\C_{mq} &= -2,5452 \text{ rad}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{Lu} &\approx 0 \\C_{Du} &\approx 0 \\C_{mu} &\approx 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{L\dot{\alpha}} &\approx 0 \\C_{D\dot{\alpha}} &\approx 0 \\C_{m\dot{\alpha}} &\approx 0\end{aligned}$$

Ala con winglets

$$\begin{aligned}C_{L\alpha} &= 4,0608 \text{ rad}^{-1} \\C_{D\alpha} &= 0,0714 \text{ rad}^{-1} \\C_{m\alpha} &= -0,5756 \text{ rad}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{L\delta_e} &= 0,2493 \text{ rad}^{-1} \\C_{D\delta_e} &\approx 0 \\C_{m\delta_e} &= -0,2750 \text{ rad}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{Lq} &= 4,1223 \text{ rad}^{-1} \\C_{Dq} &\approx 0 \\C_{mq} &= -2,9005 \text{ rad}^{-1}\end{aligned}$$

Análisis de estabilidad

Derivadas de estabilidad

- Modos longitudinales:

- Ala sin winglets:

- Corto período:

$$\lambda_{sp} = -5,6649 \pm 5,6741i \text{ [1/s]} \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega_n = 8,0179 \text{ rad/s} \\ \xi = 0,7065 \end{array} \right.$$

- Fugoide:

$$\lambda_{ph} = -0,0003 \pm 0,5376i \text{ [1/s]} \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega_n = 0,5376 \text{ rad/s} \\ \xi = 0,0006 \end{array} \right.$$

- Ala con winglets

- Corto período:

$$\lambda_{sp} = -6,0109 \pm 6,9133i \text{ [1/s]} \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega_n = 9,1610 \text{ rad/s} \\ \xi = 0,6561 \end{array} \right.$$

- Fugoide:

$$\lambda_{ph} = -0,0048 \pm 0,5548i \text{ [1/s]} \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega_n = 0,5548 \text{ rad/s} \\ \xi = 0,0086 \end{array} \right.$$

Análisis de estabilidad

Derivadas de estabilidad

- Derivadas laterales-direccionales:

Ala sin winglets

$$C_{Y\beta} = -0,0013 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{l\beta} = -0,0188 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{n\beta} = 0,0025 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{Y\delta_a} = -0,0048 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{l\delta_a} = 0,0938 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{n\delta_a} = 0,0021 \text{ rad}^{-1}$$

Ala con winglets

$$C_{Y\beta} = -0,2261 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{l\beta} = -0,0753 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{n\beta} = 0,0532 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{Y\delta_a} = -0,0145 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{l\delta_a} = 0,0985 \text{ rad}^{-1}$$

$$C_{n\delta_a} = -0,0034 \text{ rad}^{-1}$$

Análisis de estabilidad

Derivadas de estabilidad

- Derivadas laterales-direccionales:

Ala sin winglets

$$\begin{aligned}C_{Y_p} &= 0,0824 \text{ rad}^{-1} \\C_{l_p} &= -0,4196 \text{ rad}^{-1} \\C_{n_p} &= -0,0335 \text{ rad}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{Y_r} &= -0,0051 \text{ rad}^{-1} \\C_{l_r} &= 0,0400 \text{ rad}^{-1} \\C_{n_r} &= 0,0001 \text{ rad}^{-1}\end{aligned}$$

Ala con winglets

$$\begin{aligned}C_{Y_p} &= -0,1267 \text{ rad}^{-1} \\C_{l_p} &= -0,4708 \text{ rad}^{-1} \\C_{n_p} &= 0,0187 \text{ rad}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}C_{Y_r} &= 0,1443 \text{ rad}^{-1} \\C_{l_r} &= 0,0709 \text{ rad}^{-1} \\C_{n_r} &= -0,0353 \text{ rad}^{-1}\end{aligned}$$

Derivadas propulsivas:

$$\begin{aligned}C_{T_{x_1}} &= C_{D_1} \\C_{m_{T_1}} &= -C_{m_1} \\C_{T_{x_u}} &= -3C_{T_{x_1}} \\C_{m_{T_u}} &= 0 \\C_{T_{x_\alpha}} &= 0 \\C_{m_{T_\alpha}} &= 0 \\C_{n_{T_\beta}} &= 0 \\C_{T_{y_\beta}} &= 0\end{aligned}$$

Análisis de estabilidad

Derivadas de estabilidad

- Modos laterales-direccionales:

- Ala sin winglets:

- Convergencia en balance:

$$\lambda_{roll} = -9,0017 [1/s] \rightarrow T_{\frac{1}{2}} = 0,08 \text{ s}$$

- Espiral:

$$\lambda_{spiral} = 0,0518 [1/s] \rightarrow T_2 = 13,38 \text{ s}$$

- Balanceo holandés:

$$\lambda_{dr} = -0,0130 \pm 1,3613i [1/s] \left\{ \begin{array}{l} \omega_n = 1,3613 \text{ rad/s} \\ \xi = 0,0095 \end{array} \right.$$

- Ala con winglets:

- Convergencia en balance:

$$\lambda_{roll} = -10,1832 [1/s] \rightarrow T_{\frac{1}{2}} = 0,07 \text{ s}$$

- Espiral:

$$\lambda_{spiral} = 0,0543 [1/s] \rightarrow T_2 = 12,76 \text{ s}$$

- Balanceo holandés:

$$\lambda_{dr} = -0,5927 \pm 4,4158i [1/s] \left\{ \begin{array}{l} \omega_n = 4,4554 \text{ rad/s} \\ \xi = 0,1330 \end{array} \right.$$

Análisis de estabilidad

Derivadas de estabilidad

- Conclusiones:
 - Longitudinal:
 - Mejores características aerodinámicas ($C_{L\alpha} \uparrow$).
 - Aumento de la potencia de control del elevador ($C_{L\delta_e} \uparrow$).
 - Estabilidad estática mejorada ($|C_{m\alpha}| \uparrow$).
 - Modo de corto período más rápido ($|C_{m_q}| \uparrow$).
 - Modo fugoide aumenta notablemente su amortiguamiento.
 - Lateral-direccional:
 - Ligero aumento de la potencia de control lateral ($C_{l\delta_a} \uparrow$).
 - Modo espiral empeora ligeramente.
 - Modo de convergencia en balance más rápido ($|C_{l_p}| \uparrow$).
 - Modo de balanceo holandés: importante incremento en amortiguamiento y frecuencia.

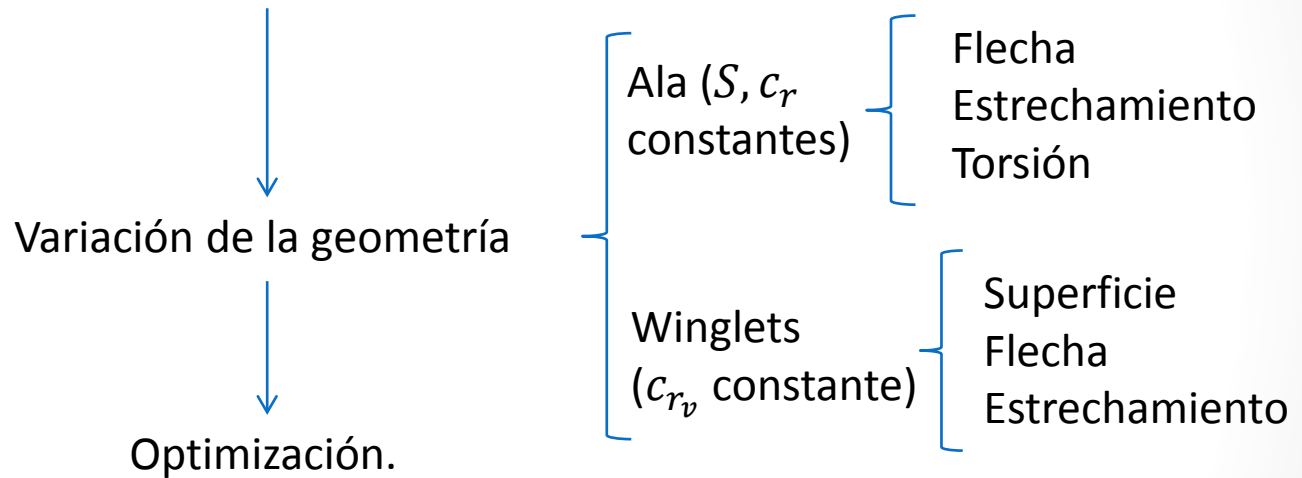
Análisis de estabilidad

- Análisis de estabilidad:
 - Derivadas de estabilidad.
 - **Estudio paramétrico y respuestas dinámicas:**
 - Flecha del ala.
 - Estrechamiento del ala.
 - Superficie de los winglets.

Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

- Análisis de diferentes configuraciones de ala voladora (22 casos).



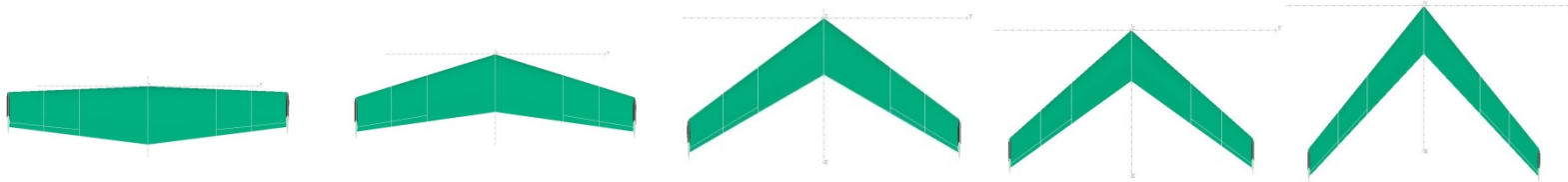
- Margen estático constante: $SM = 14,18\%$
- Estudio de:
 - Modos.
 - Centro aerodinámico del ala y el winglet.

→ Respuestas dinámicas

Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Flecha del ala



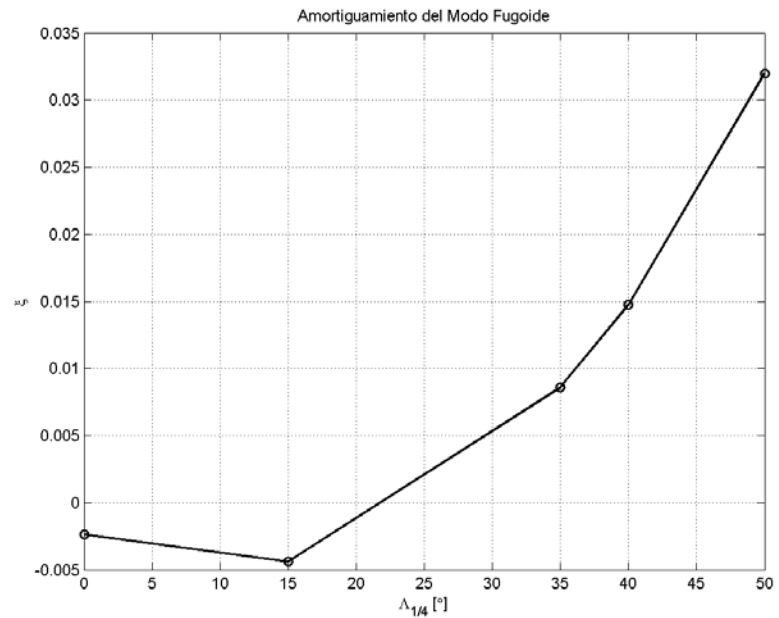
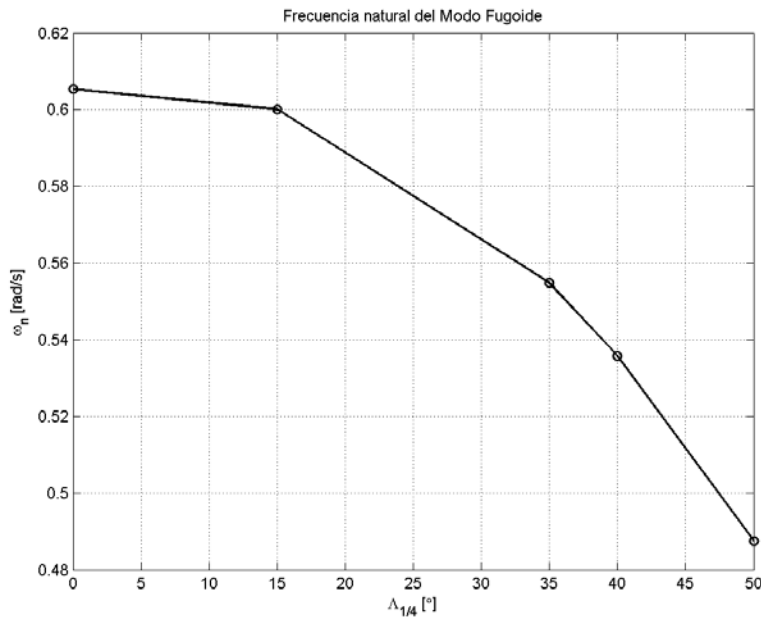
- Se producen cambios importantes en:
 - Modo fugoide → **inestable** para flechas pequeñas!
 - Modo de balanceo holandés.

Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Flecha del ala

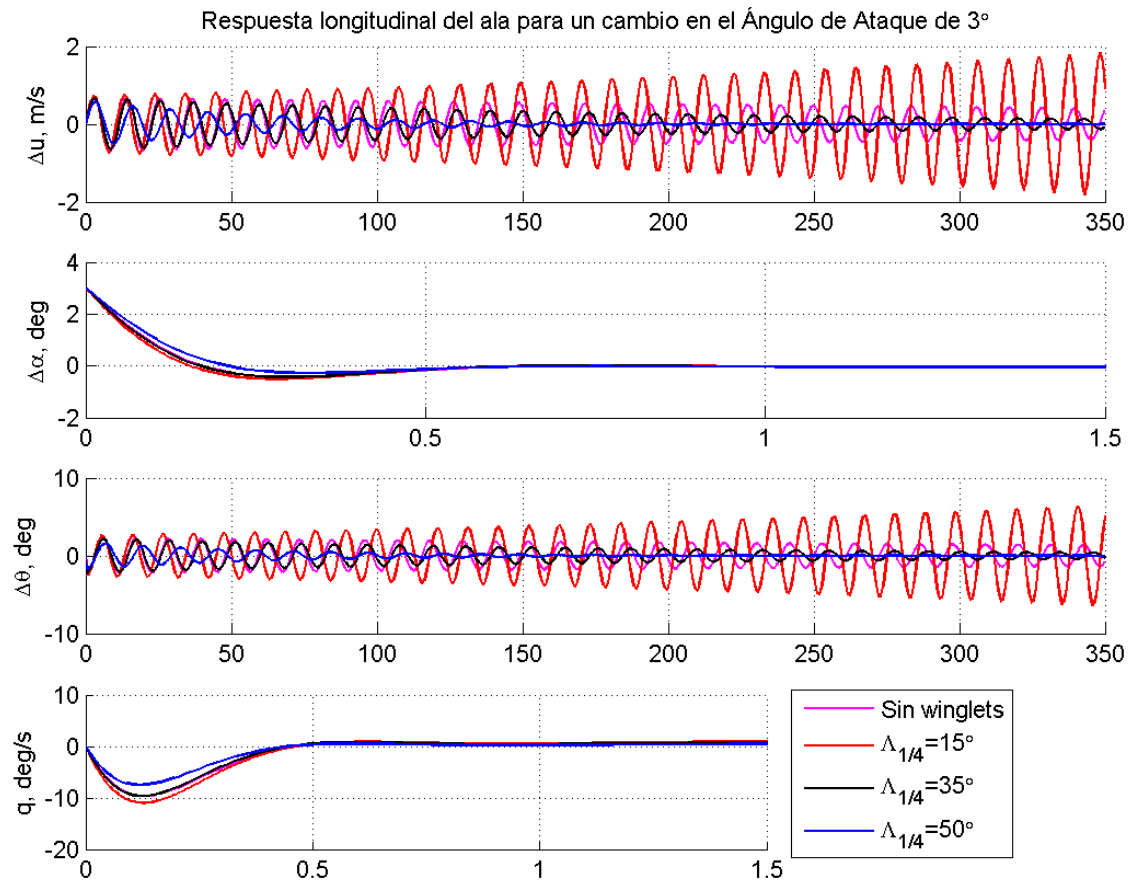
Fugoide



Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Flecha del ala

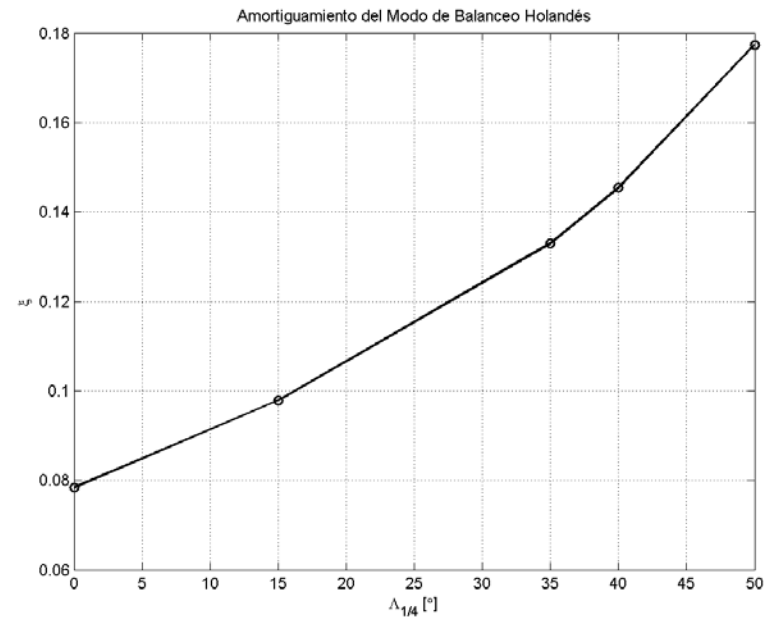
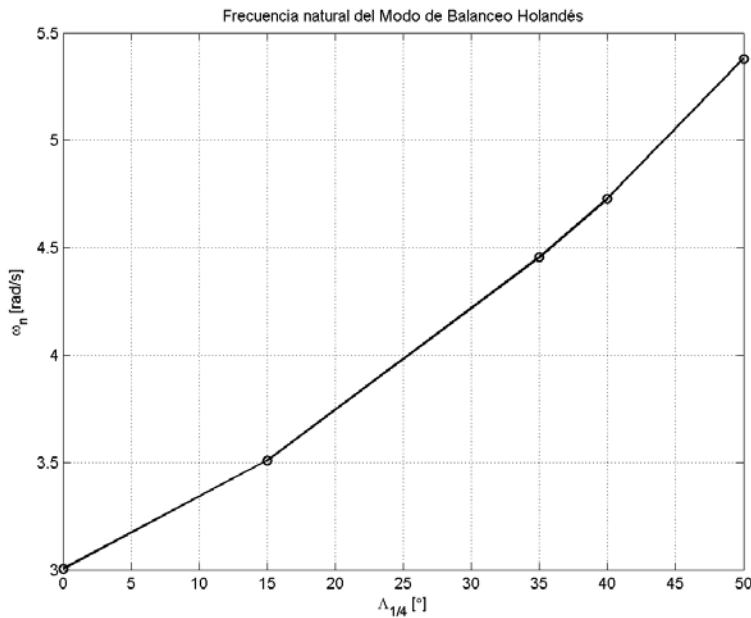


Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Flecha del ala

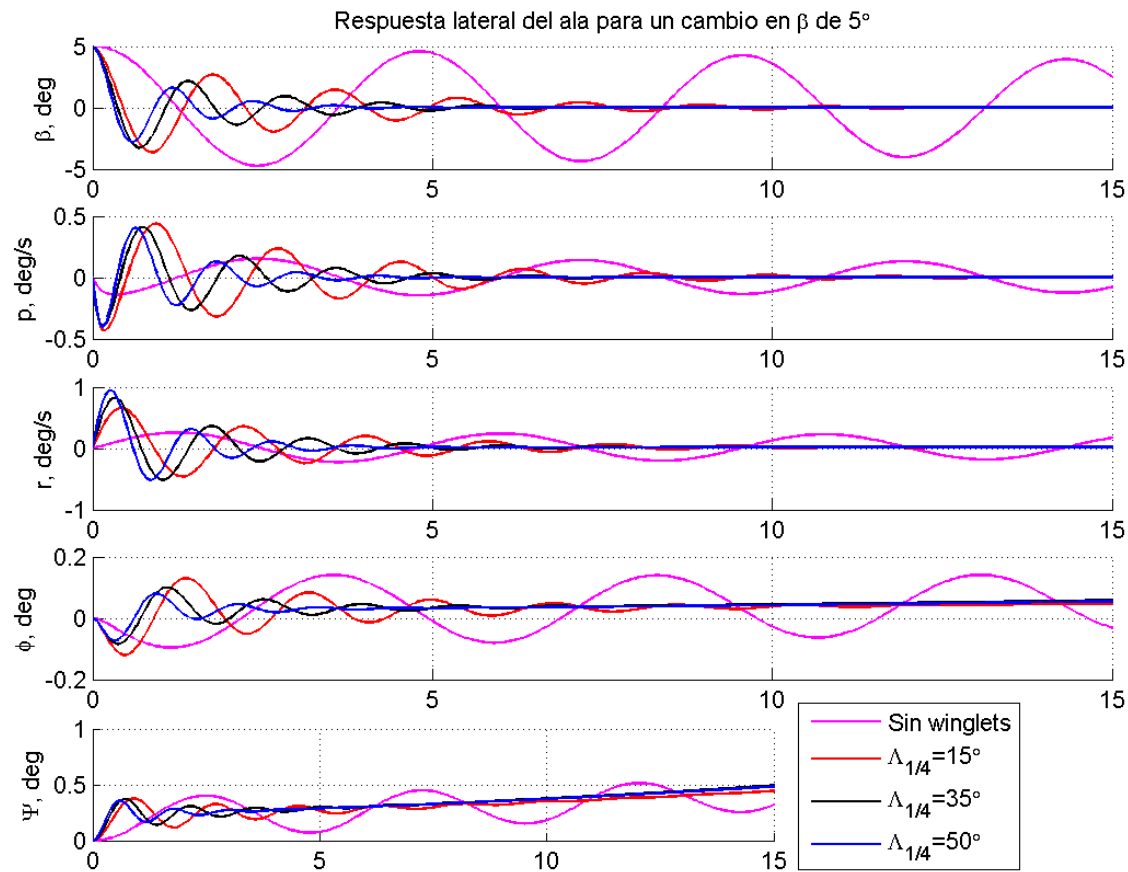
Balanceo holandés



Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

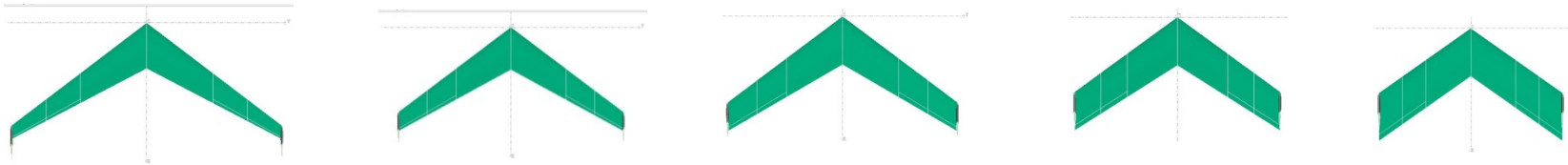
Flecha del ala



Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Estrechamiento del ala



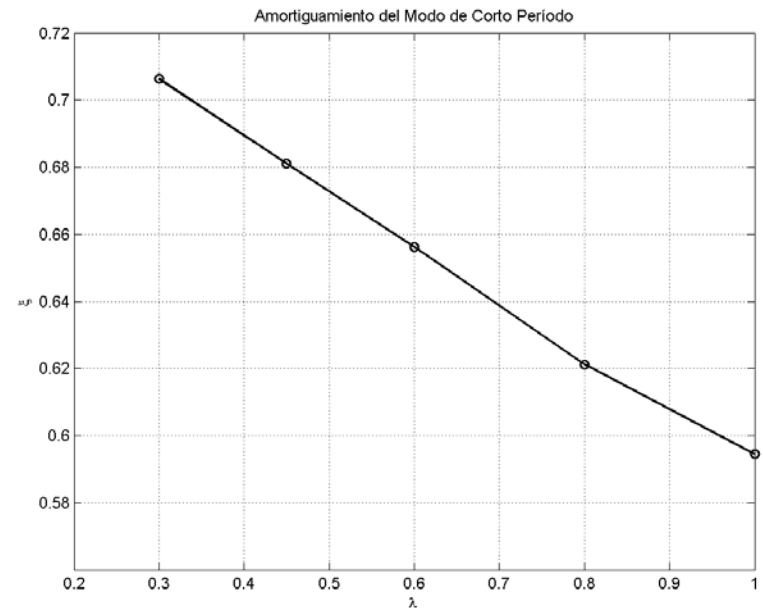
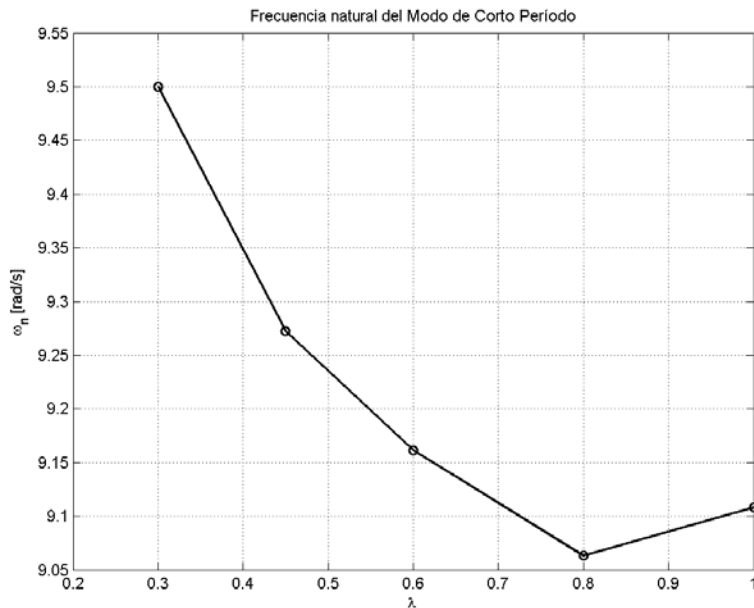
- Se producen cambios importantes en:
 - Modo de corto período.
 - Modo de balanceo holandés → ¡**inestable** para estrechamientos grandes!

Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Estrechamiento del ala

Corto período

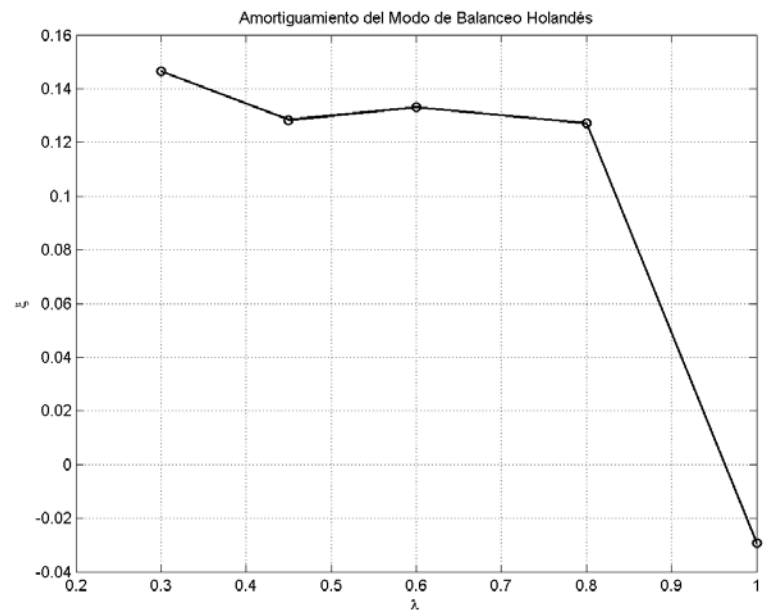
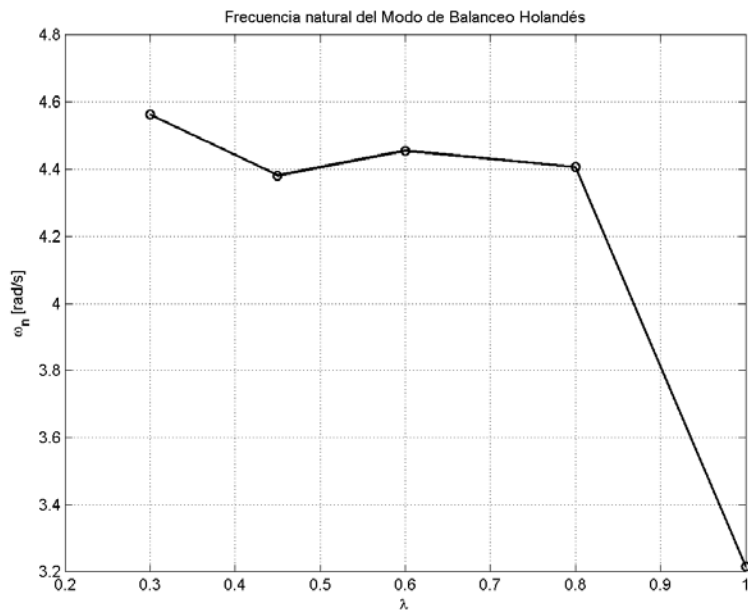


Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Estrechamiento del ala

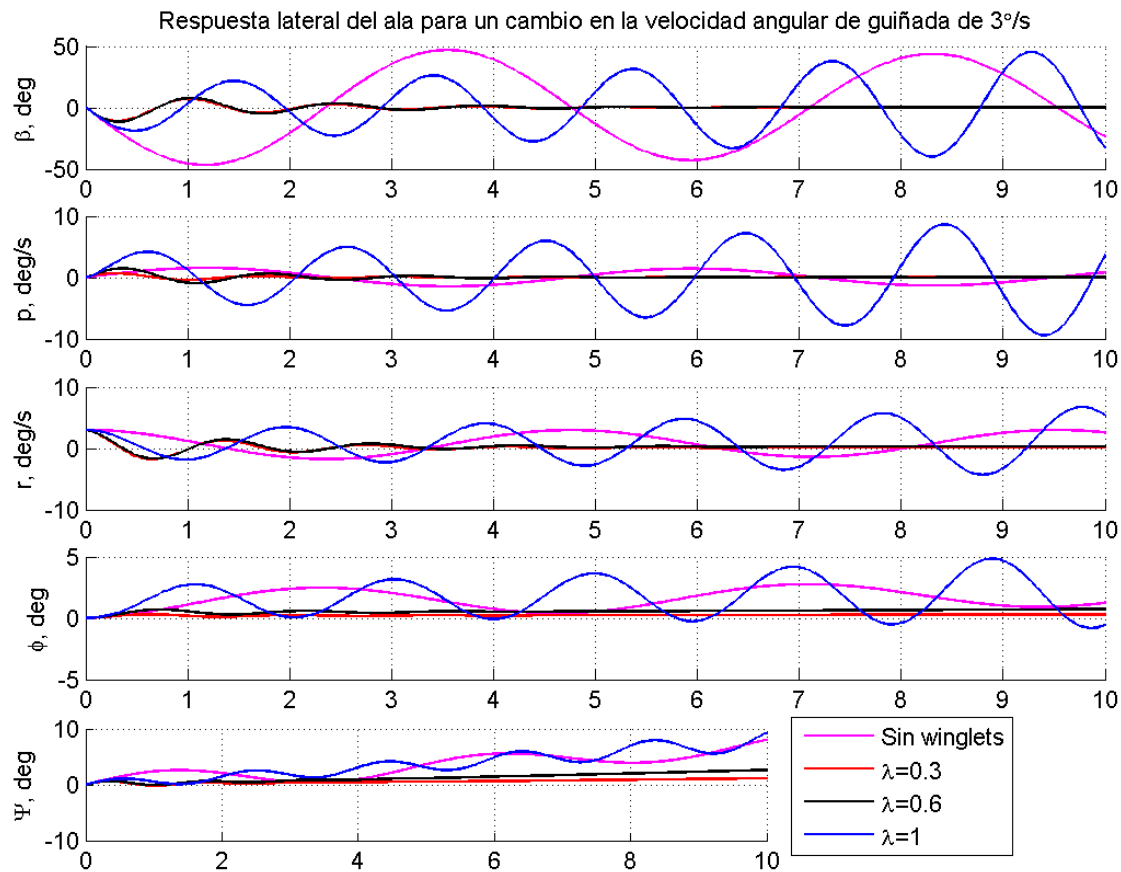
Balanceo holandés



Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

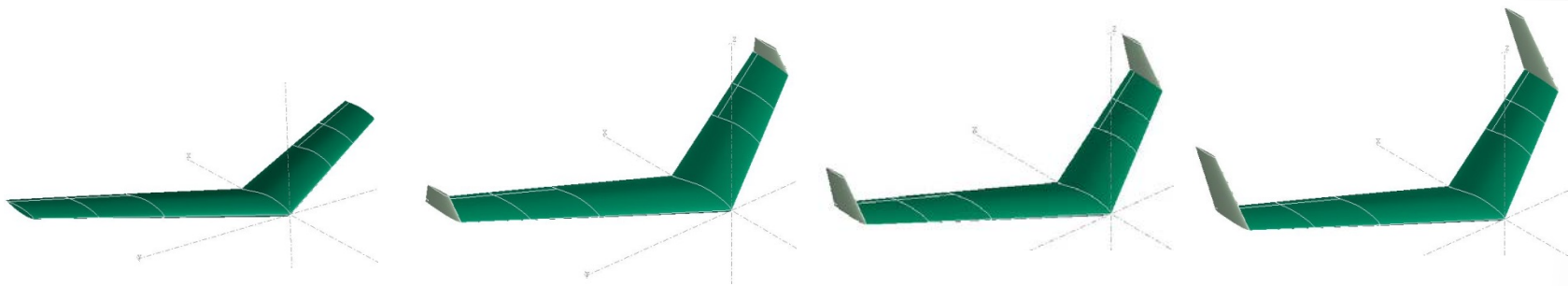
Estrechamiento del ala



Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Superficie de los winglets



- Se producen cambios importantes en:
 - Modo fugoide.
 - Modo de balanceo holandés.



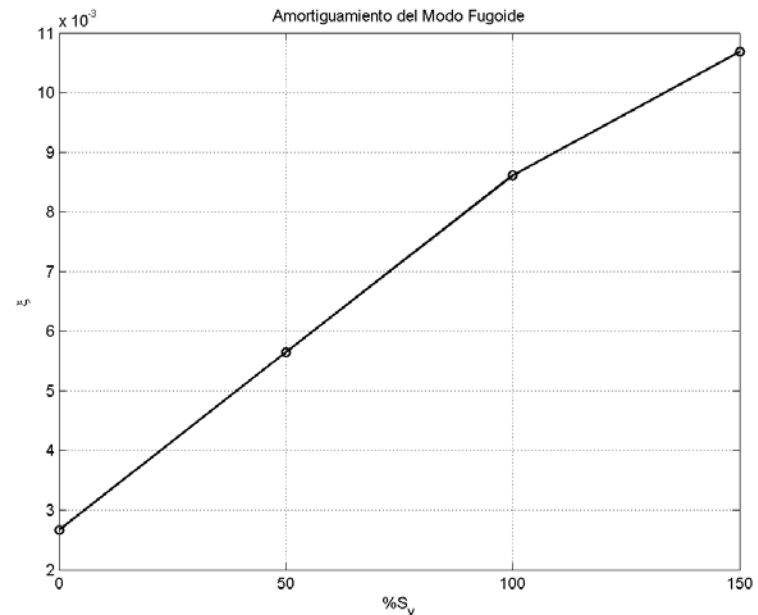
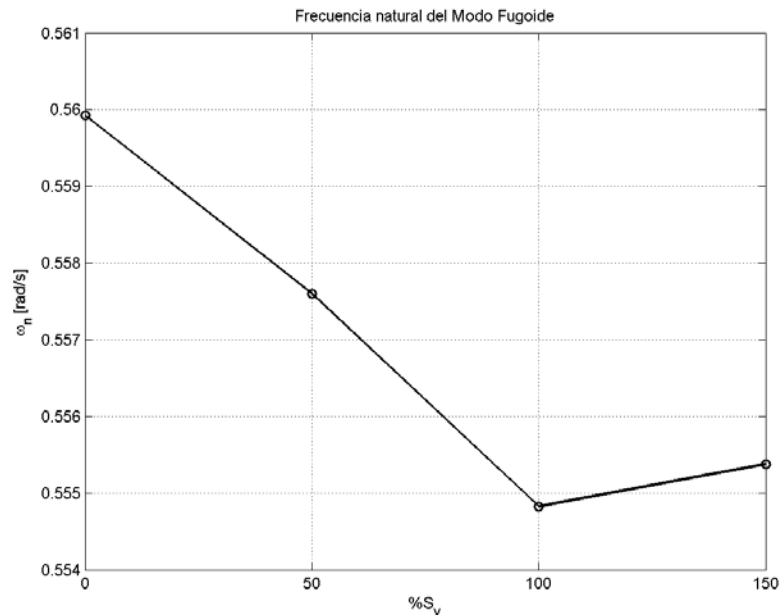
¡Amortiguamiento
aumenta con la
superficie de winglet!

Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Superficie de los winglets

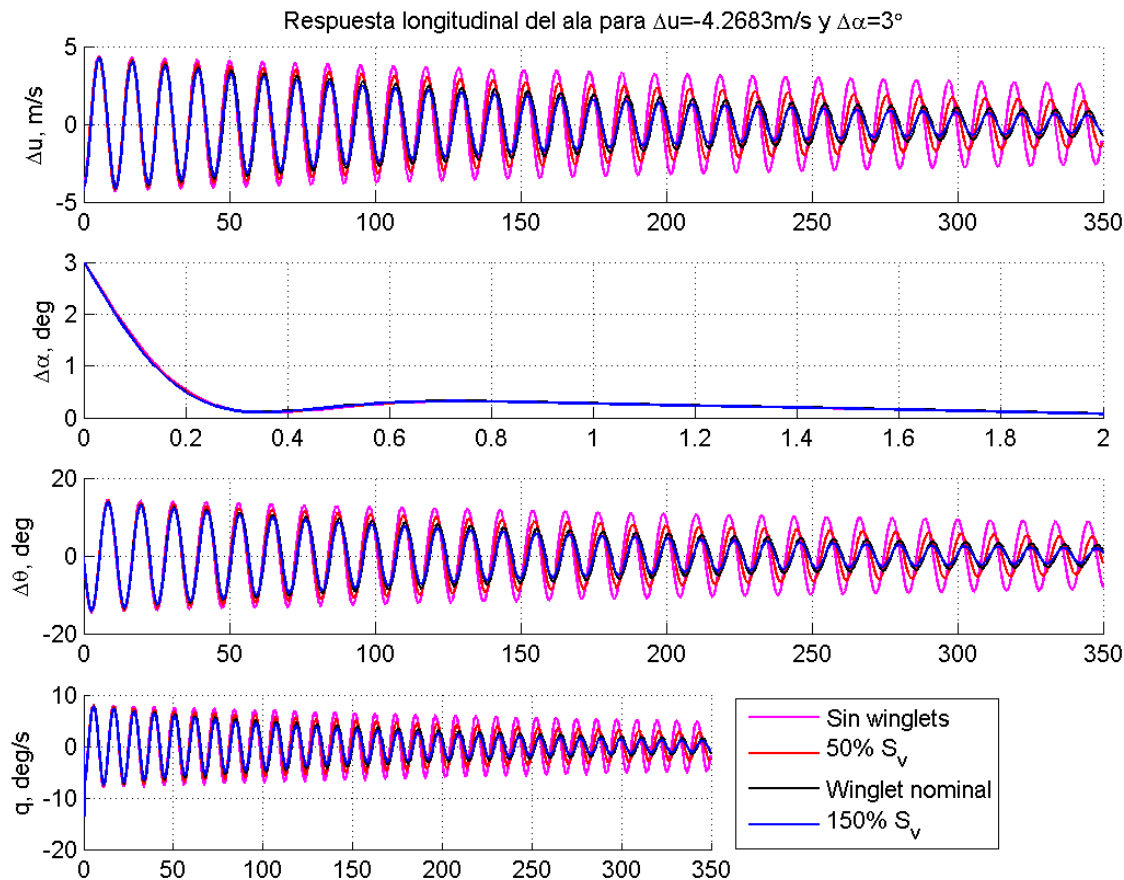
Fugoide



Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Superficie de los winglets

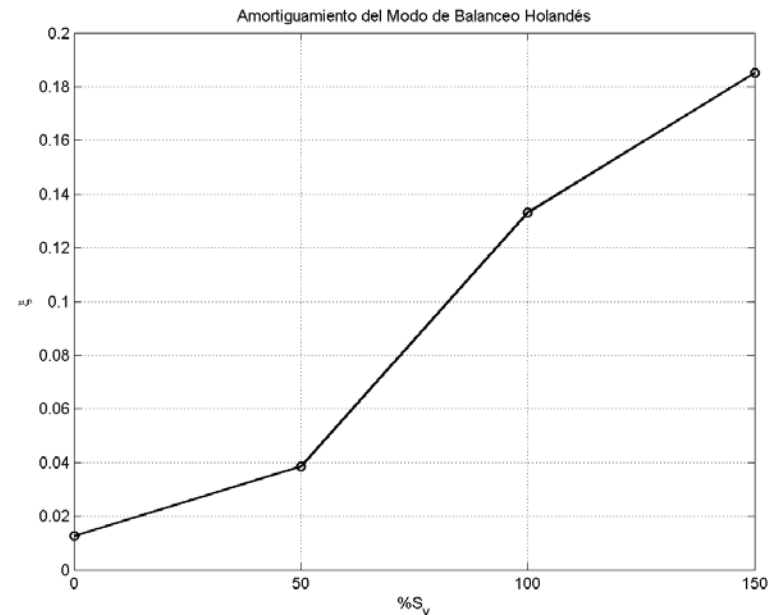
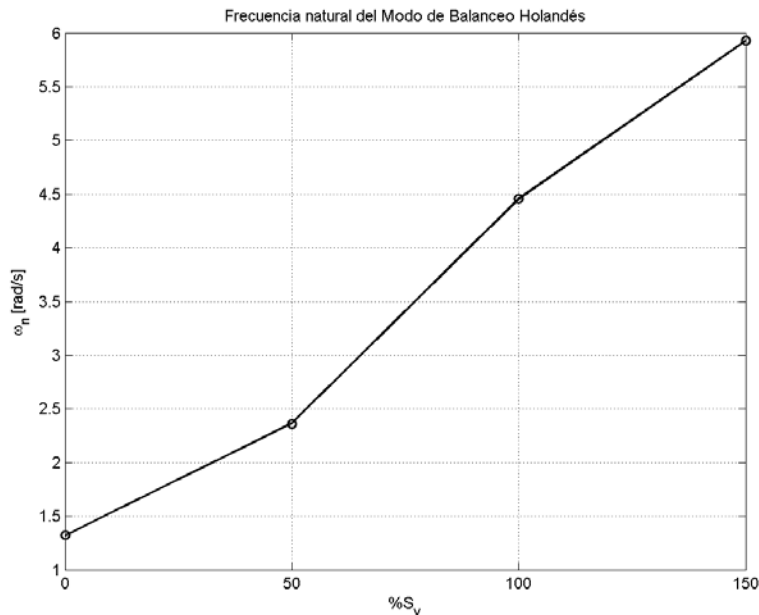


Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Superficie de los winglets

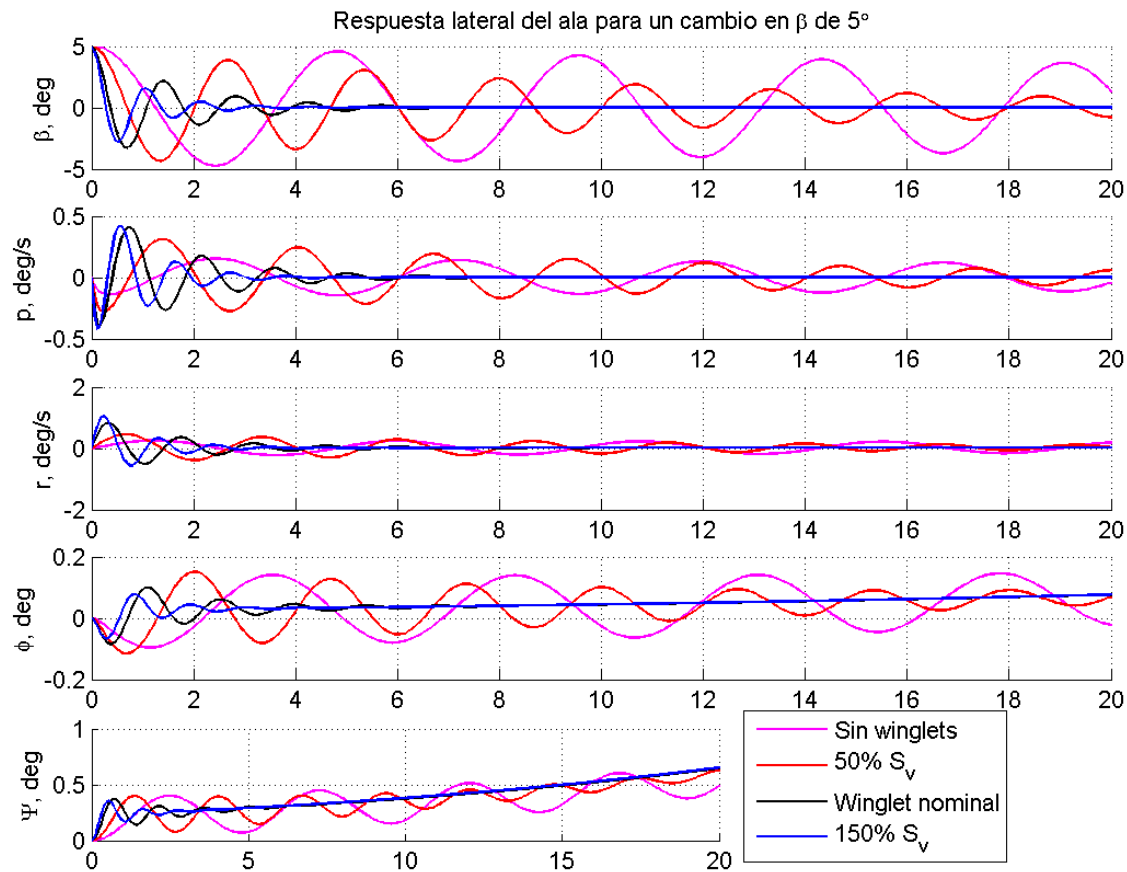
Balanceo holandés



Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Superficie de los winglets



Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

- Conclusiones:
 - Flecha del ala: permite un fugoide estable y mejora el modo de balanceo holandés.
 - Estrechamiento del ala: un valor pequeño evita que el modo de balanceo holandés se haga inestable.
 - Superficie del winglet: imprescindible para amortiguar el fugoide y el balanceo holandés.
 - La flecha y el estrechamiento del winglet permiten optimizar ciertas características de estabilidad.
 - El modo espiral no llega a hacerse estable y presenta tendencias contrarias al resto de modos.

Índice general

- Descripción del proyecto.
- Análisis del ala voladora:
 - Geometría nominal.
 - Estudios de aerodinámica.
 - Estudios de estabilidad.
- **Conclusiones.**
- **Futuras líneas de trabajo.**

Conclusiones

- Los estudios de aerodinámica han permitido obtener unas tendencias y realizar una primera estimación de las derivadas de estabilidad.
- Estos resultados se han comparado con el módulo de estabilidad de XFLR5 y las ecuaciones paramétricas.



- Derivadas de estabilidad
 - Modos
- } Ventajas de los winglets.

- El estudio paramétrico ha permitido comparar las características de estabilidad de distintas configuraciones de ala voladora.



Diseño eficiente de alas voladoras.

Futuras líneas de trabajo

- Análisis aerodinámico y de estabilidad del ala voladora utilizando distintos perfiles para el ala o los winglets.
- Realizar un análisis aerodinámico en un software de CFD para determinar con precisión el coeficiente de resistencia del ala voladora, modelando elementos adicionales como el tren de aterrizaje.
- Modelado en software CAD del ala voladora → determinación más precisa de las inercias.
- Optimización de las características geométricas, acoplando todos los casos del estudio paramétrico.
- Estudio detallado del modo espiral para conseguir hacerlo estable.
- Cálculo de las fuerzas aerodinámicas en túnel de viento → determinación de las derivadas de estabilidad y validación definitiva de las herramientas empleadas (XFLR5/ecuaciones paramétricas).
- Diseño de estrategias de guiado y control para alas voladoras.



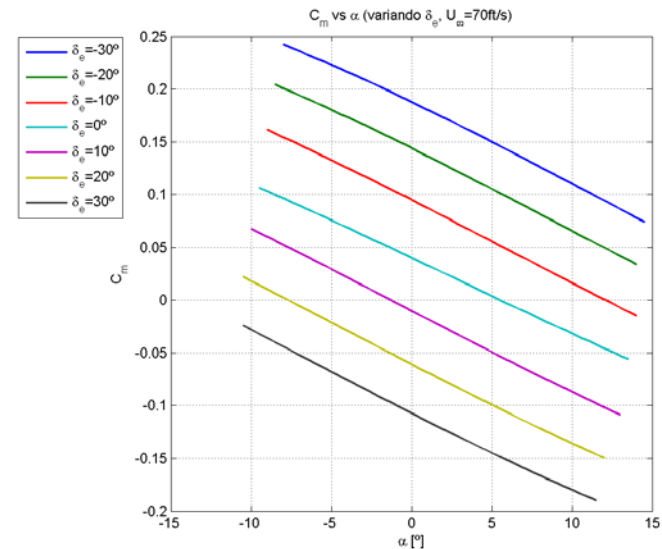
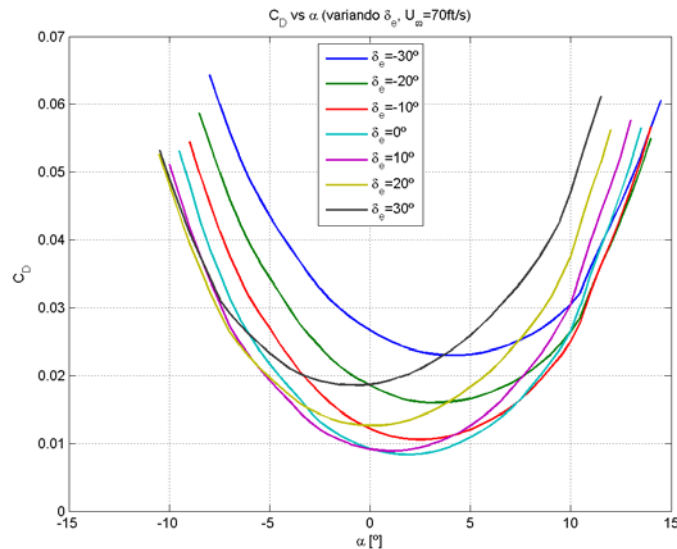
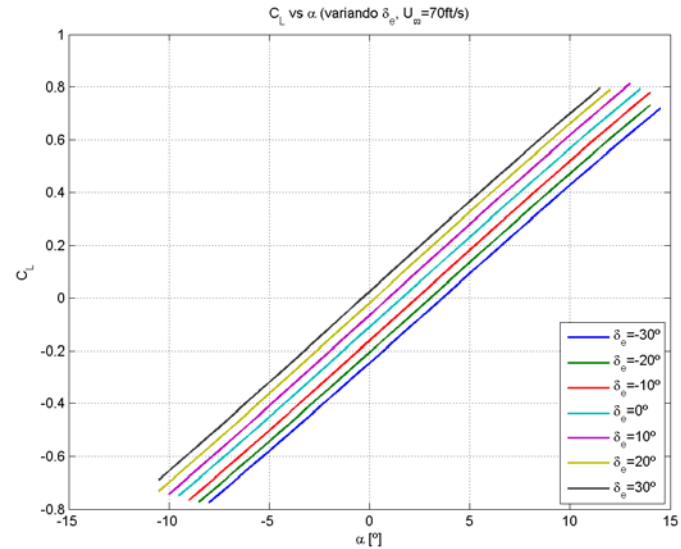
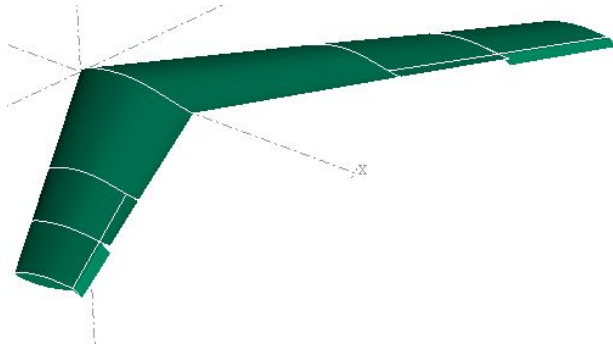
Muchas gracias por su atención.

Análisis de aerodinámica

Estudios 3D

Ala sin winglets

- Deflexión de elevadores:

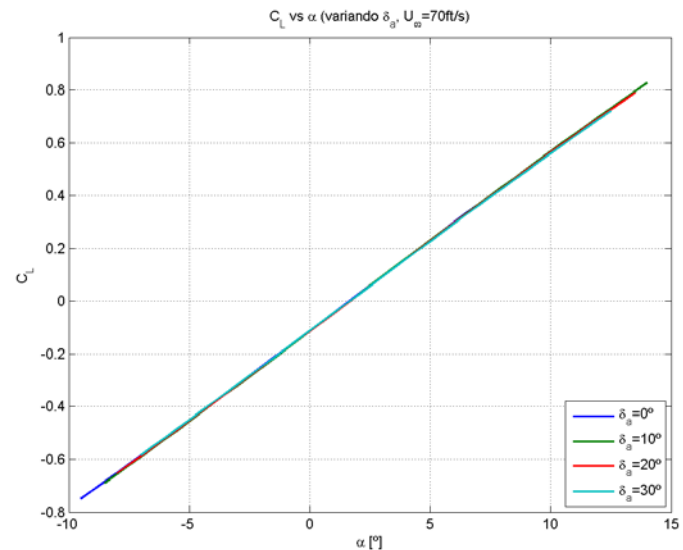
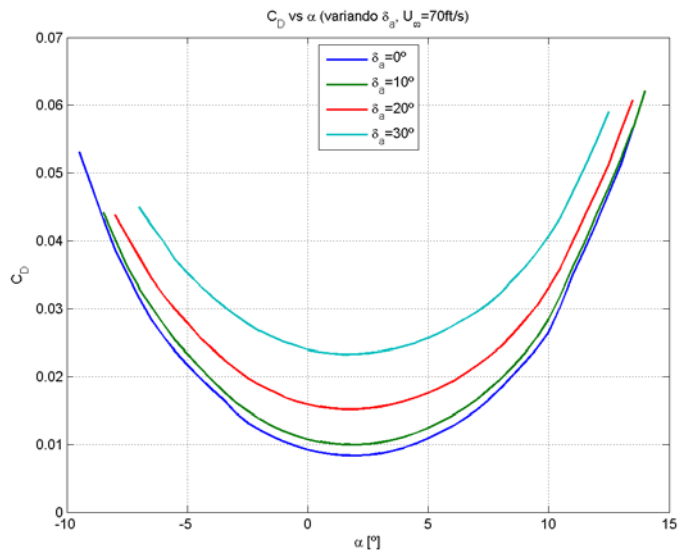
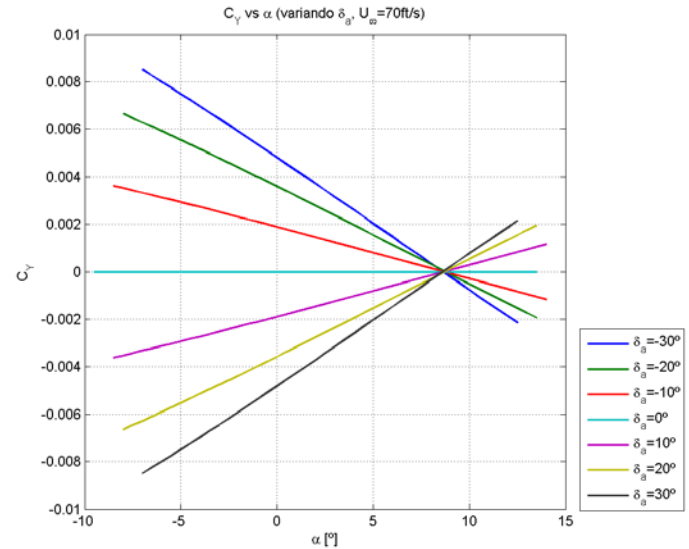


Análisis de aerodinámica

Estudios 3D

Ala sin winglets

- Deflexión de alerones:

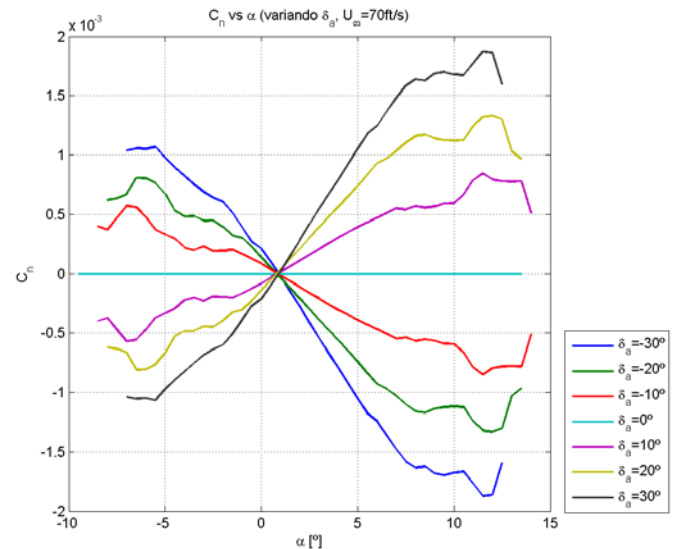
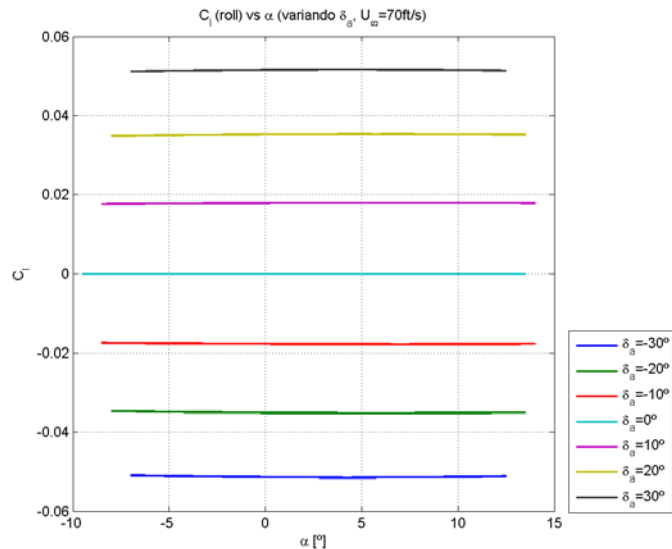
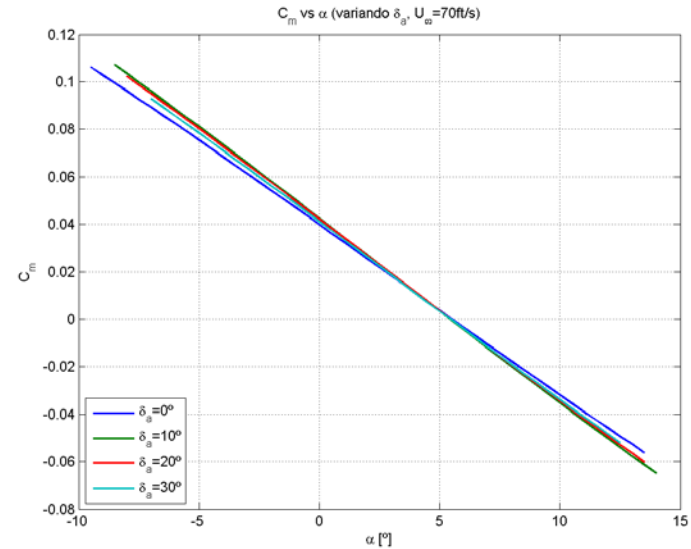


Análisis de aerodinámica

Estudios 3D

Ala sin winglets

- Deflexión de alerones:

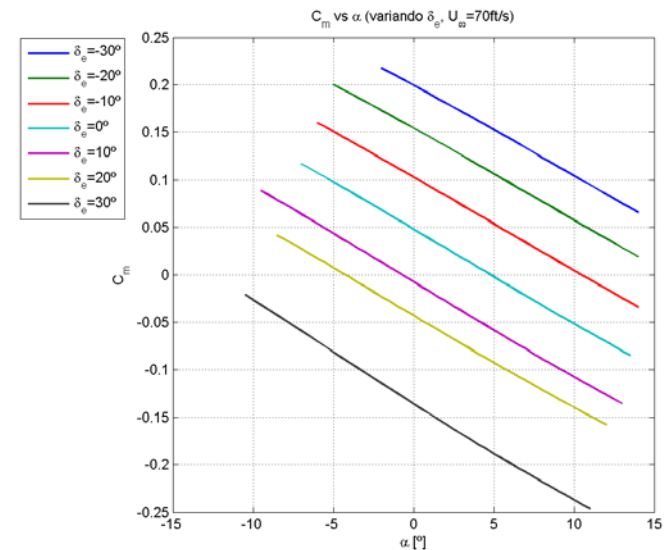
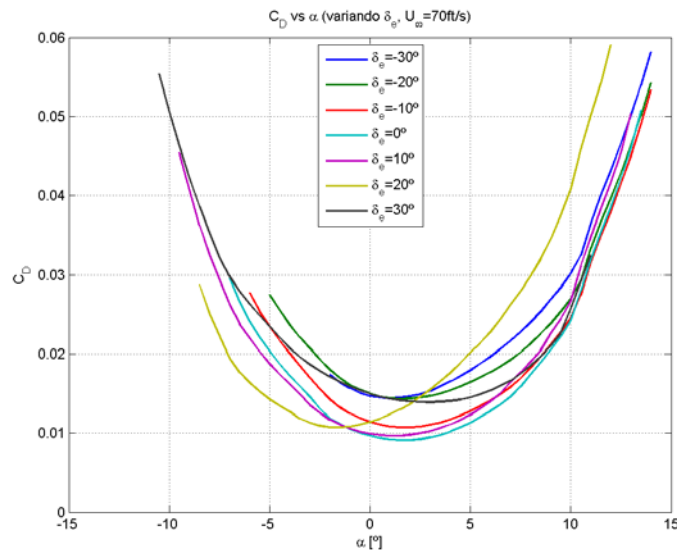
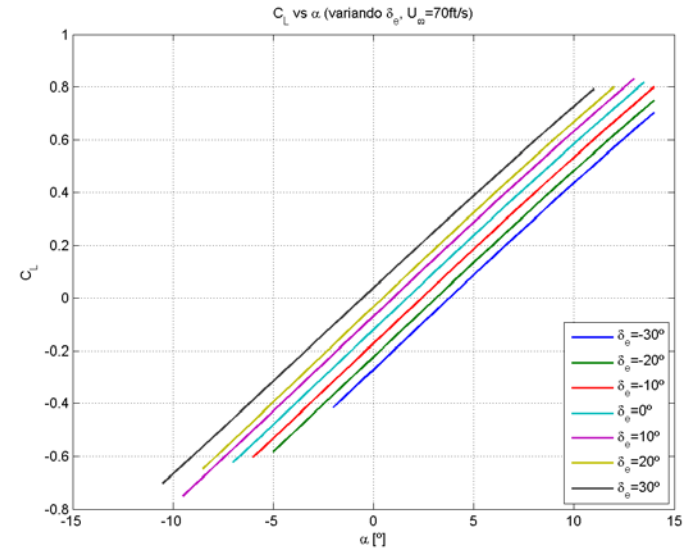
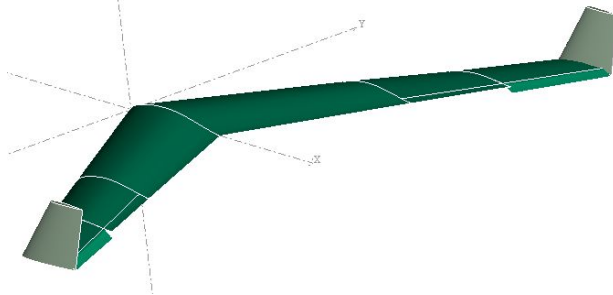


Análisis de aerodinámica

Estudios 3D

Ala con winglets

- Deflexión de elevadores:

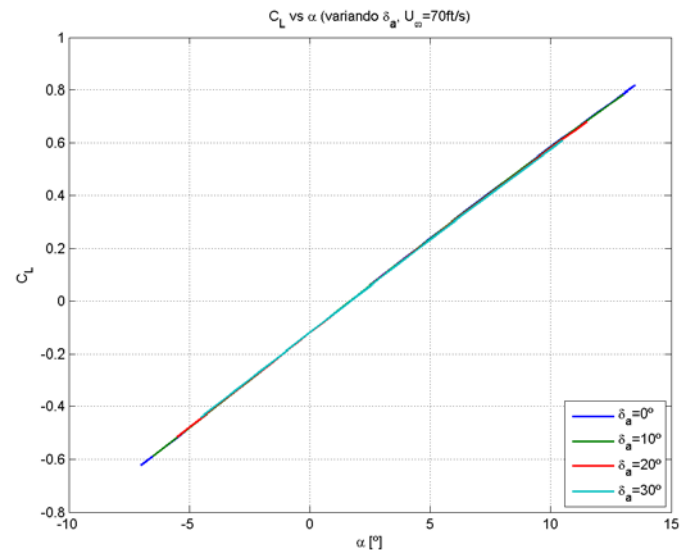
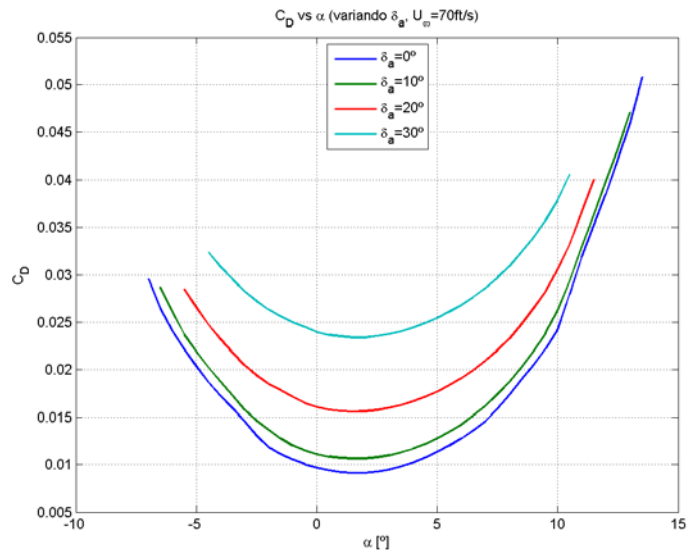
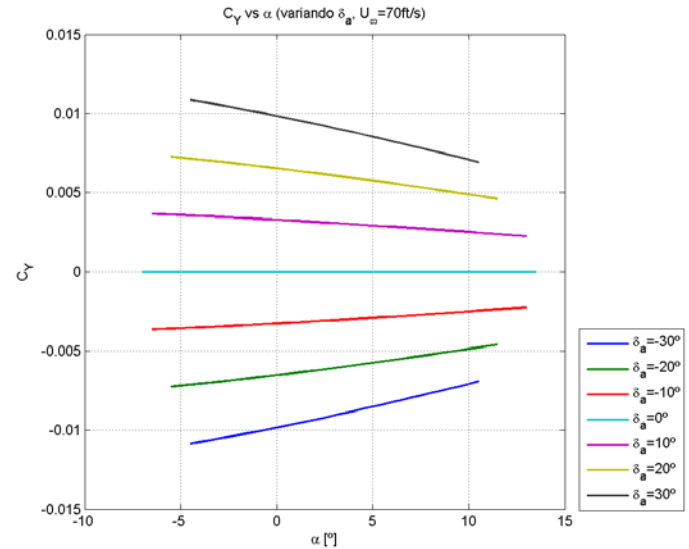
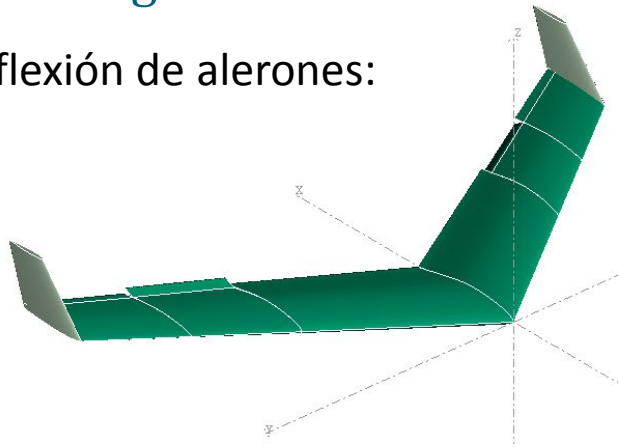


Análisis de aerodinámica

Estudios 3D

Ala con winglets

- Deflexión de alerones:

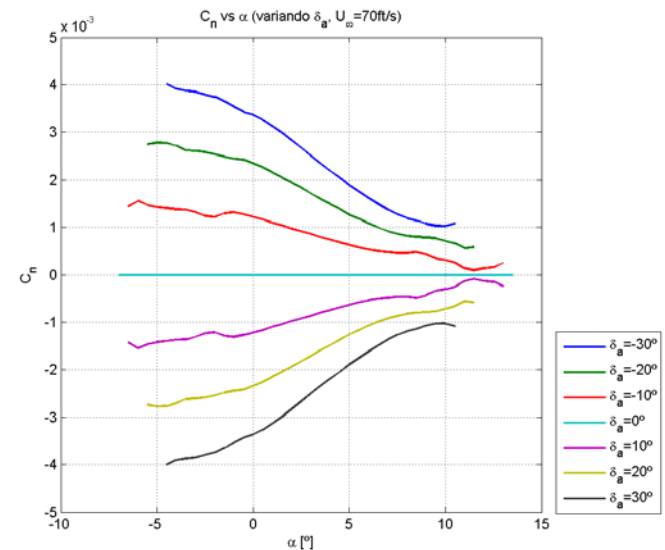
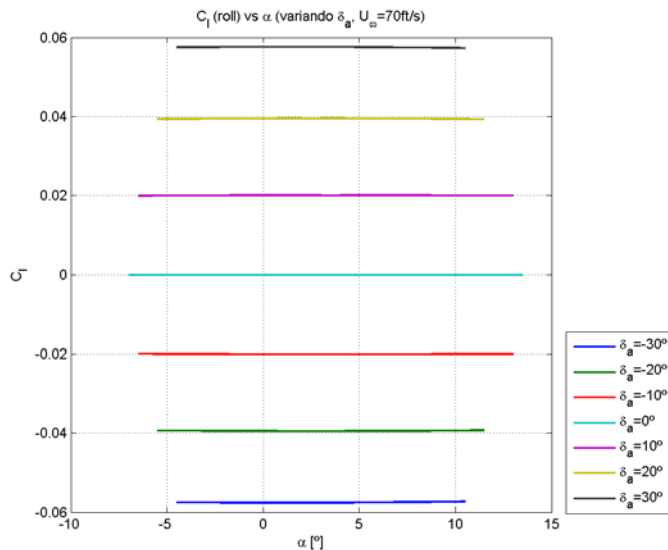
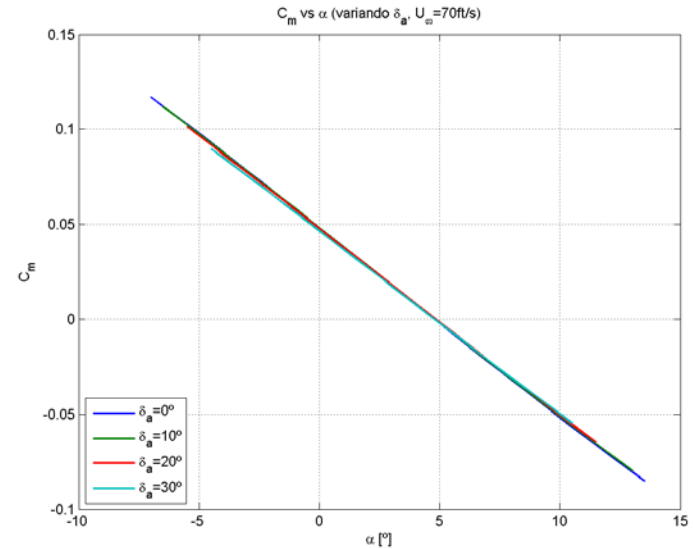
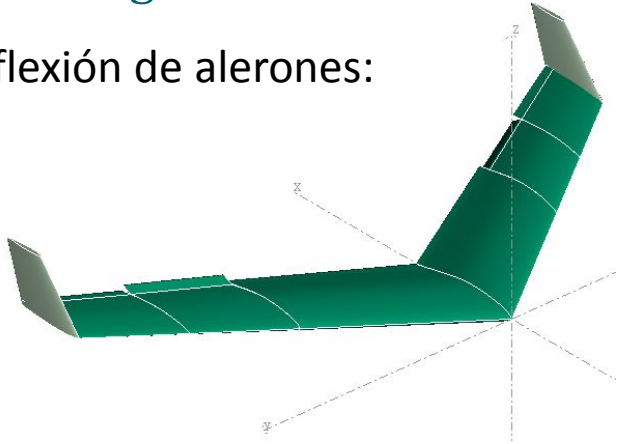


Análisis de aerodinámica

Estudios 3D

Ala con winglets

- Deflexión de alerones:



Análisis de estabilidad

Estudio paramétrico y respuestas dinámicas

Estrechamiento del ala

