

Introducción al diseño y optimización aerodinámica de un coche de Fórmula 1

Trabajo Fin de Máster.
Universidad Complutense de Madrid.

Yaiza González de la Torre

26 Septiembre 2017

Índice

- 1 Introducción
- 2 Introducción a la aerodinámica
- 3 Diseño del modelo
 - Planteamiento del problema
 - Resultados de los modelos
- 4 Optimización del alerón trasero
 - Algoritmos de optimización
 - Resultados de la optimización
- 5 Conclusiones

Índice

- 1 **Introducción**
- 2 Introducción a la aerodinámica
- 3 Diseño del modelo
 - Planteamiento del problema
 - Resultados de los modelos
- 4 Optimización del alerón trasero
 - Algoritmos de optimización
 - Resultados de la optimización
- 5 Conclusiones

Problema

- La *Fórmula 1* es un deporte donde la aerodinámica cobra una vital importancia, ya que gracias a ello se mejora la eficiencia del automóvil.

Problema

- La *Fórmula 1* es un deporte donde la aerodinámica cobra una vital importancia, ya que gracias a ello se mejora la eficiencia del automóvil.
- **Objetivo:** Diseñar un alerón trasero de Fórmula 1, de forma que aporte al vehículo una buena tracción con la carretera, empleando el software de simulación **COMSOL** y la herramienta de optimización **GOP**.

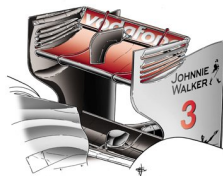


Figura: Alerón trasero de un F1.

Índice

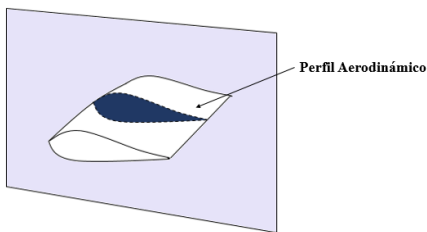
- 1 Introducción
- 2 Introducción a la aerodinámica
- 3 Diseño del modelo
 - Planteamiento del problema
 - Resultados de los modelos
- 4 Optimización del alerón trasero
 - Algoritmos de optimización
 - Resultados de la optimización
- 5 Conclusiones

Conceptos aerodinámicos

- **Aerodinámica** rama de la mecánica de fluidos que estudia la interacción entre el aire y cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre ellos.

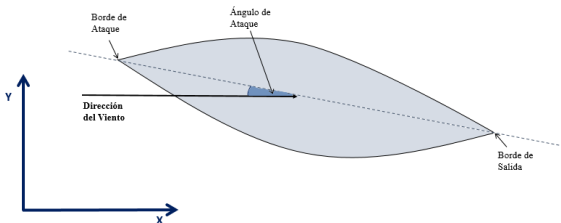
Conceptos aerodinámicos

- **Aerodinámica** rama de la mecánica de fluidos que estudia la interacción entre el aire y cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre ellos.
- **Perfil aerodinámico** figura que resulta de la intersección de la pieza con un plano paralelo al plano de simetría de la aeronave.



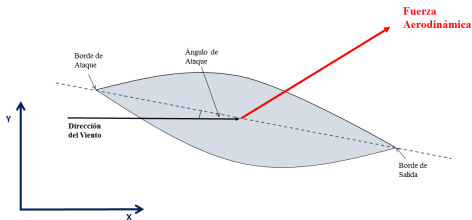
Conceptos aerodinámicos

- **Aerodinámica** rama de la mecánica de fluidos que estudia la interacción entre el aire y cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre ellos.
- **Perfil aerodinámico** figura que resulta de la intersección de la pieza con un plano paralelo al plano de simetría de la aeronave.
- **Ángulo de ataque** ángulo que forma la dirección del vector velocidad respecto al eje longitudinal del perfil.



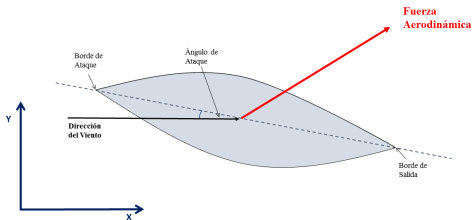
Conceptos aerodinámicos

- **Cargas aerodinámicas** fuerzas que actúan sobre un cuerpo aerodinámico, en este caso, sobre el perfil.



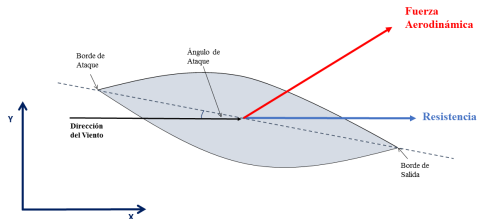
Conceptos aerodinámicos

- **Cargas aerodinámicas** fuerzas que actúan sobre un cuerpo aerodinámico, en este caso, sobre el perfil.
 - **Resistencia**
 - **Sustentación**



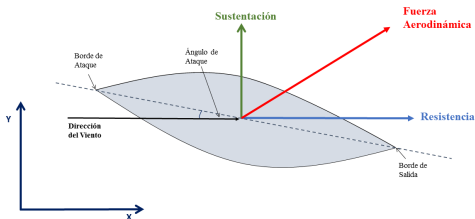
Conceptos aerodinámicos

- **Cargas aerodinámicas** fuerzas que actúan sobre un cuerpo aerodinámico, en este caso, sobre el perfil.
 - **Resistencia** componente paralela a la dirección del flujo. Genera una oposición al avance del cuerpo.
 - **Sustentación**



Conceptos aerodinámicos

- **Cargas aerodinámicas** fuerzas que actúan sobre un cuerpo aerodinámico, en este caso, sobre el perfil.
 - **Resistencia** componente paralela a la dirección del flujo. Genera una oposición al avance del cuerpo.
 - **Sustentación** componente perpendicular a la dirección del flujo. Provoca la elevación o empuje hacia el suelo de la pieza.

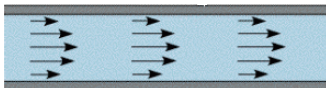


Flujo laminar y turbulento

- **Número de Reynolds** número adimensional que relaciona la fuerzas inerciales y la fuerzas viscosas presentes en un fluido: $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$.

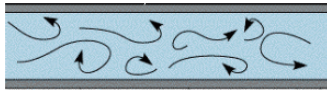
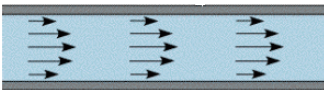
Flujo laminar y turbulento

- **Número de Reynolds** número adimensional que relaciona la fuerzas inerciales y la fuerzas viscosas presentes en un fluido: $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$.
- **Flujo laminar**
Partículas siguen trayectorias uniformes ($Re \leq 2100$).
- **Flujo turbulento**
Partículas con trayectorias desordenadas ($Re \geq 4000$).



Flujo laminar y turbulento

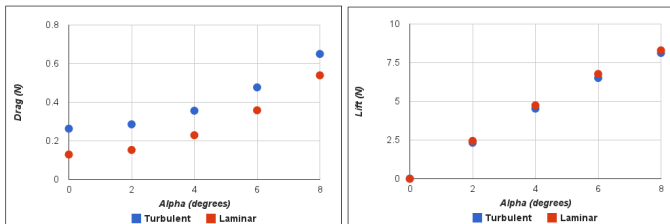
- **Número de Reynolds** número adimensional que relaciona la fuerzas inerciales y la fuerzas viscosas presentes en un fluido: $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$.
- **Flujo laminar**
Partículas siguen trayectorias uniformes ($Re \leq 2100$).
- **Flujo turbulento**
Partículas con trayectorias desordenadas ($Re \geq 4000$).



- Cuando se trabaja en el diseño de coches de Fórmula 1 se debe considerar un fluido turbulento.

Estudio de los flujos laminar y turbulento

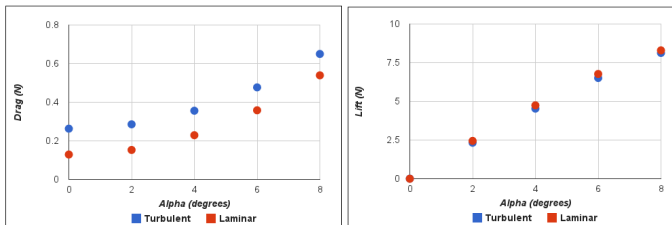
El estudio ¹ realiza una comparación de las curvas de sustentación y resistencia sobre el perfil alar *NACA0012* en un flujo laminar y en un flujo turbulento, siendo los resultados:



¹Smith R., "Laminar vs Turbulent Flow Over Airfoils" (2010)

Estudio de los flujos laminar y turbulento

El estudio ¹ realiza una comparación de las curvas de sustentación y resistencia sobre el perfil alar *NACA0012* en un flujo laminar y en un flujo turbulento, siendo los resultados:



A la vista de los resultados, debido a las capacidades del software y puesto que el caso turbulento es mas costoso computacionalmente consideraremos el aire como un fluido laminar.

¹Smith R., "Laminar vs Turbulent Flow Over Airfoils" (2010)

Ecuaciones de Navier-Stokes

- **Ecuación de continuidad**

- **Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento.**

Ecuaciones de Navier-Stokes

- **Ecuación de continuidad**

Por el principio de conservación de masa y considerando el aire como un fluido incompresible, de densidad constante:

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

- **Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento.**

Ecuaciones de Navier-Stokes

- **Ecuación de continuidad**

Por el principio de conservación de masa y considerando el aire como un fluido incompresible, de densidad constante:

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

- **Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento.**

Por la 2ª ley de Newton y teniendo en cuenta la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [\rho \mathbf{l} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \rho \mathbf{F}_m$$

Índice

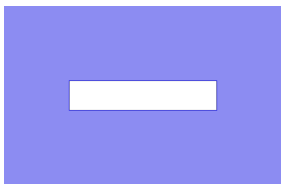
- 1 Introducción
- 2 Introducción a la aerodinámica
- 3 Diseño del modelo**
 - Planteamiento del problema
 - Resultados de los modelos
- 4 Optimización del alerón trasero
 - Algoritmos de optimización
 - Resultados de la optimización
- 5 Conclusiones

Índice

- 1 Introducción
- 2 Introducción a la aerodinámica
- 3 Diseño del modelo**
 - Planteamiento del problema
 - Resultados de los modelos
- 4 Optimización del alerón trasero
 - Algoritmos de optimización
 - Resultados de la optimización
- 5 Conclusiones

Modelo general

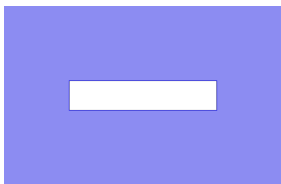
- Modelos planteados en COMSOL



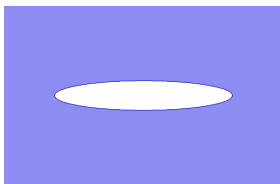
a) Modelo 1

Modelo general

- Modelos planteados en COMSOL



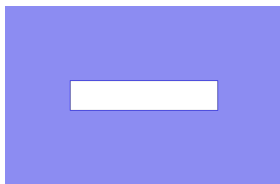
a) Modelo 1



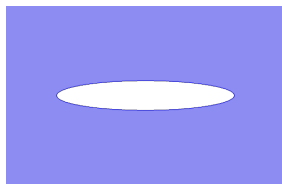
b) Modelo 2

Modelo general

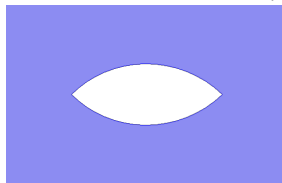
- Modelos planteados en COMSOL



a) Modelo 1

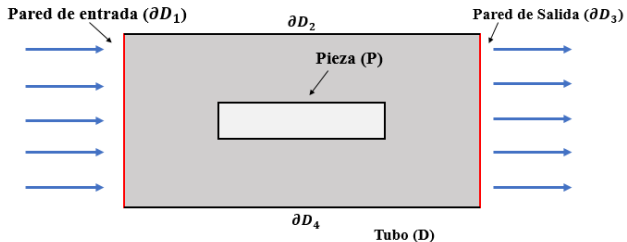


b) Modelo 2

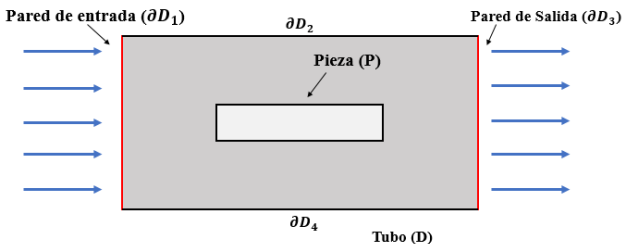


c) Modelo 3

Modelo general



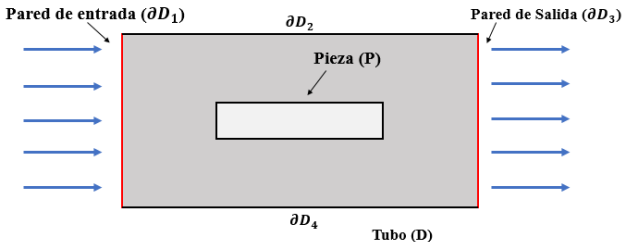
Modelo general



- Ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\begin{cases} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [\rho\mathbf{l} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] + \rho\mathbf{F}_m \\ \rho\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases}$$

Modelo general



- Condiciones de contorno:

$$\begin{cases} \mathbf{u} = 0 & \text{si } \partial P \cup \partial D_2 \cup \partial D_4, \\ \mathbf{u} = u_0 \mathbf{n} & \text{si } \partial D_1, \\ \mathbf{n}^T [\rho \mathbf{l} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] = 0 & \text{si } \partial D_3. \end{cases}$$

Cálculo de las curvas de sustentación y resistencia

- Resolviendo las ecuaciones con las cond. de contorno se obtiene el campo de velocidad y la distribución de presión del aire.

²LYU, P. "*How do I compute lift and drag*"

Cálculo de las curvas de sustentación y resistencia

- Resolviendo las ecuaciones con las cond. de contorno se obtiene el campo de velocidad y la distribución de presión del aire.
- Para calcular las fuerzas se realiza la integral sobre los bordes de la pieza del esfuerzo total ².

²LYU, P. "How do I compute lift and drag"

Cálculo de las curvas de sustentación y resistencia

- Resolviendo las ecuaciones con las cond. de contorno se obtiene el campo de velocidad y la distribución de presión del aire.
- Para calcular las fuerzas se realiza la integral sobre los bordes de la pieza del esfuerzo total ².
- Las expresiones son:

²LYU, P. "How do I compute lift and drag"

Cálculo de las curvas de sustentación y resistencia

- Resolviendo las ecuaciones con las cond. de contorno se obtiene el campo de velocidad y la distribución de presión del aire.
- Para calcular las fuerzas se realiza la integral sobre los bordes de la pieza del esfuerzo total ².
- Las expresiones son:

²LYU, P. "How do I compute lift and drag"

Cálculo de las curvas de sustentación y resistencia

- Resolviendo las ecuaciones con las cond. de contorno se obtiene el campo de velocidad y la distribución de presión del aire.
- Para calcular las fuerzas se realiza la integral sobre los bordes de la pieza del esfuerzo total ².
- Las expresiones son:

$$d = \int_{\partial P} \tilde{\Pi}_x dl$$

²LYU, P. "How do I compute lift and drag"

Cálculo de las curvas de sustentación y resistencia

- Resolviendo las ecuaciones con las cond. de contorno se obtiene el campo de velocidad y la distribución de presión del aire.
- Para calcular las fuerzas se realiza la integral sobre los bordes de la pieza del esfuerzo total ².
- Las expresiones son:

$$d = \int_{\partial P} \tilde{\Pi}_x dl \qquad l = \int_{\partial P} \tilde{\Pi}_y dl$$

²LYU, P. "How do I compute lift and drag"

Cálculo de las curvas de sustentación y resistencia

- Resolviendo las ecuaciones con las cond. de contorno se obtiene el campo de velocidad y la distribución de presión del aire.
- Para calcular las fuerzas se realiza la integral sobre los bordes de la pieza del esfuerzo total ².
- Las expresiones son:

$$d = \int_{\partial P} \tilde{\Pi}_x dl \qquad l = \int_{\partial P} \tilde{\Pi}_y dl$$

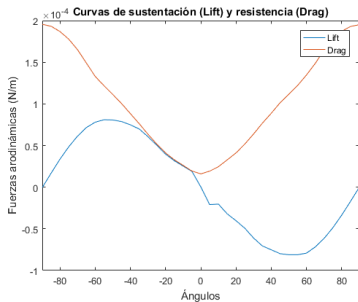
- Calculamos las fuerzas de los modelos para ángulos entre -90° y 90° para obtener las curvas de sustentación y resistencia.

²LYU, P. "How do I compute lift and drag"

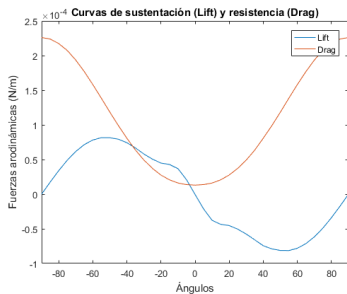
Índice

- 1 Introducción
- 2 Introducción a la aerodinámica
- 3 Diseño del modelo**
 - Planteamiento del problema
 - **Resultados de los modelos**
- 4 Optimización del alerón trasero
 - Algoritmos de optimización
 - Resultados de la optimización
- 5 Conclusiones

Modelo 1 y 2



Modelo 1.



Modelo 2.

Figura: Curvas de sustentación y resistencia en función de los ángulos.

Curva de sustentación modelo 1

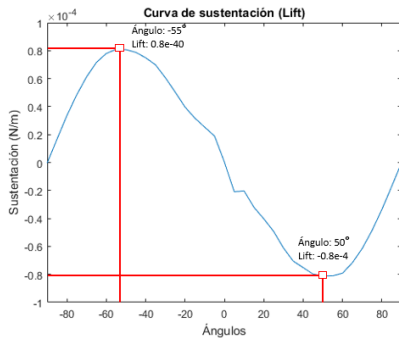
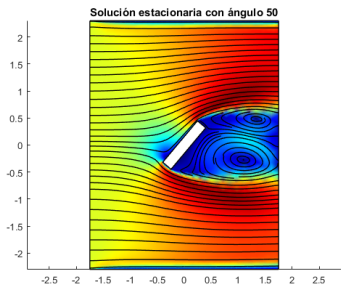
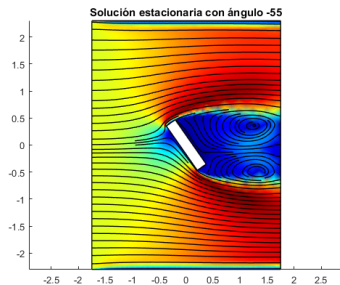


Figura: Valor máximo y mínimo de la sustentación en el modelo 1.

Curva de sustentación modelo 1



Solución para 50° .



Solución para -55° .

Curva de sustentación modelo 2

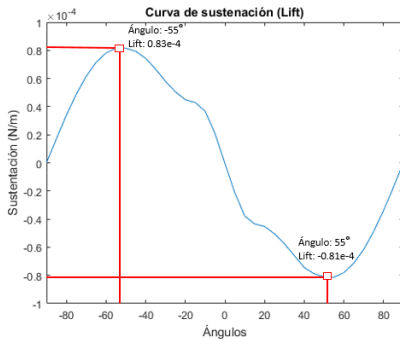
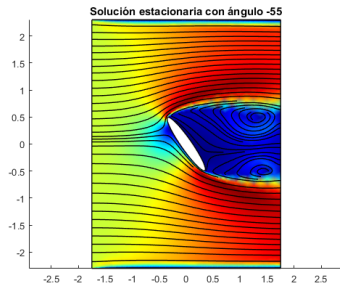
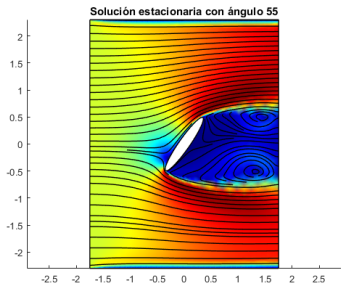


Figura: Valor máximo y mínimo de sustentación en el modelo 2.

Curva de sustentación modelo 2



Modelo 3

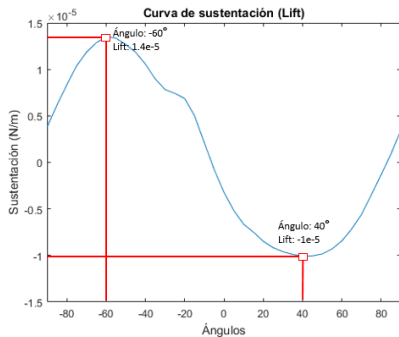
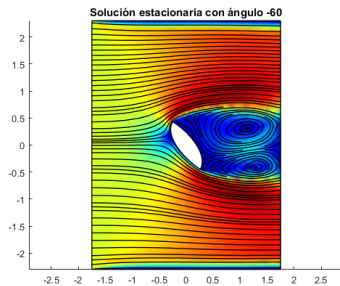
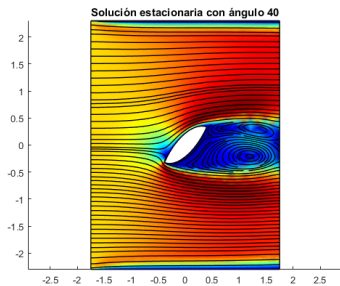


Figura: Curva de sustentación modelo 3.

Modelo 3



Índice

- 1 Introducción
- 2 Introducción a la aerodinámica
- 3 Diseño del modelo
 - Planteamiento del problema
 - Resultados de los modelos
- 4 Optimización del alerón trasero
 - Algoritmos de optimización
 - Resultados de la optimización
- 5 Conclusiones

Índice

- 1 Introducción
- 2 Introducción a la aerodinámica
- 3 Diseño del modelo
 - Planteamiento del problema
 - Resultados de los modelos
- 4 Optimización del alerón trasero**
 - Algoritmos de optimización**
 - Resultados de la optimización
- 5 Conclusiones

Algoritmo genético

- **Alg. Genético:** busca la solución óptima a partir de una población inicial, aplicándole una serie de operadores genéticos.
- *Parámetros:* número de individuos, número de generaciones, probabilidad de mutación, probabilidad de cruce y precisión.
- *Operadores genéticos:*

Algoritmo

Paso 1. Definir población inicial y los parámetros de entrada.

Paso 2. En cada generación:

Paso 2.1. Aplicar operadores genéticos a la población (*selección, cruce, mutación y supervivencia*).

Paso 2.2. Si la función de costes de algún individuo de la nueva generación alcanza cierta precisión, finalizar e ir al Paso 3.

Paso 3. Tomar como solución el individuo con menor función de coste.

Algoritmo de mejora de la condición inicial

- Se ha empleado un algoritmo de mejora de la condición inicial: **Algoritmo multicapa (MLA)**³.
- Dada una población X_1^0 , para cada capa i se define un algoritmo $A_i(X_1^0)$ tal que:

Algoritmo A_i


Paso 1. Para l desde 1 hasta $t_i \in \mathbb{N}$:

Paso 1.1. Se toma $o_l = A_{i-1}(X_l^0)$.

Paso 1.2. Se calcula X_{l+1}^0 siendo:

$$X_{l+1}^0 = \begin{cases} X_{l,j}^0 & \text{si } h_0(o_l) = h_0(x_{l,j}^0) \\ \text{proj}_{\Omega}(x_{l,j}^0 - h_0(o_l) \frac{o_l - x_{l,j}^0}{h_0(o_l) - h_0(x_{l,j}^0)}) & \text{e.o.c} \end{cases}$$

Paso 3. Devuelve $\text{argmin}\{h_i(o_m), m = 1, \dots, t_i\}$

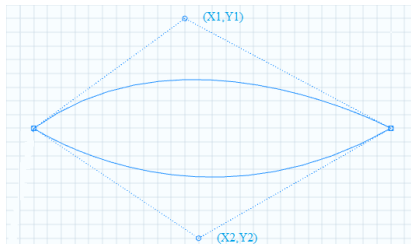
³IVORRA, B., MOHAMMADI, B. Y RAMOS, Á.M., "A multi-layer line search method to improve the initialization of optimization algorithms" 

Índice

- 1 Introducción
- 2 Introducción a la aerodinámica
- 3 Diseño del modelo
 - Planteamiento del problema
 - Resultados de los modelos
- 4 Optimización del alerón trasero
 - Algoritmos de optimización
 - Resultados de la optimización
- 5 Conclusiones

Aplicación algoritmos

- Optimizamos el modelo 3, siendo los parámetros a optimizar el ángulo de ataque y los puntos (X_1, Y_1) y (X_2, Y_2) .



- Se ha empleado la herramienta de optimización *Global Optimization Platform* (GOP).

Resultados de la optimización

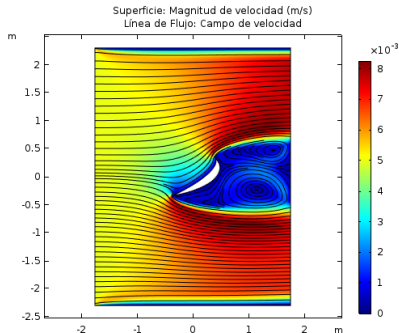
- Se ha tomado una población de 180 individuos y 10 generaciones, una probabilidad de mutación de 15 % y de cruce de 45 %.

Resultados de la optimización

- Se ha tomado una población de 180 individuos y 10 generaciones, una probabilidad de mutación de 15 % y de cruce de 45 %.
- Se ha aplicado el MLA con una capa.

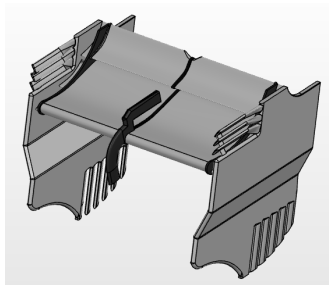
Resultados de la optimización

- Se ha tomado una población de 180 individuos y 10 generaciones, una probabilidad de mutación de 15 % y de cruce de 45 %.
- Se ha aplicado el MLA con una capa.
- Solución: $(X_1, Y_1) = (0,56, -0,36)$ y $(X_2, Y_2) = (0,59, -0,7)$, un ángulo de ataque de $42,92^\circ$ y sustentación $-3,0205764 \times 10^{-5}$ N/m.



Resultados de la optimización

- Se ha tomado una población de 180 individuos y 10 generaciones, una probabilidad de mutación de 15 % y de cruce de 45 %.
- Se ha aplicado el MLA con una capa.
- Solución: $(X_1, Y_1) = (0,56, -0,36)$ y $(X_2, Y_2) = (0,59, -0,7)$, un ángulo de ataque de $42,92^\circ$ y sustentación $-3,0205764 \times 10^{-5}$ N/m.

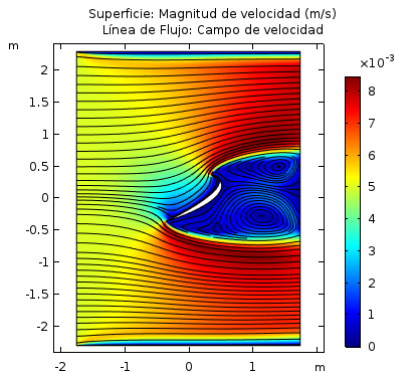


Resultados de la optimización

- Tomamos ahora la población inicial la anterior solución y 20 generaciones.

Resultados de la optimización

- Tomamos ahora la población inicial la anterior solución y 20 generaciones.
- Solución: $(X_1, Y_1) = (0,84, -0,49)$ y $(X_2, Y_2) = (0,79, -0,69)$, un ángulo de ataque de $45,69^\circ$ y sustentación $-3,0869 \times 10^{-5}$ N/m.



Índice

- 1 Introducción
- 2 Introducción a la aerodinámica
- 3 Diseño del modelo
 - Planteamiento del problema
 - Resultados de los modelos
- 4 Optimización del alerón trasero
 - Algoritmos de optimización
 - Resultados de la optimización
- 5 Conclusiones

Conclusiones y futuro trabajo

• Conclusiones

- 1 Independientemente del diseño del alerón, el ángulo de ataque que genera una mínima sustentación está entre 40° y 60° .
- 2 Los resultados obtenidos son similares a los diseños de los alerones traseros reales de la Fórmula 1. Por tanto, la metodología utilizada es de interés.

Conclusiones y futuro trabajo

• Conclusiones

- 1 Independientemente del diseño del alerón, el ángulo de ataque que genera una mínima sustentación está entre 40° y 60° .
- 2 Los resultados obtenidos son similares a los diseños de los alerones traseros reales de la Fórmula 1. Por tanto, la metodología utilizada es de interés.

Conclusiones y futuro trabajo

• Conclusiones

- 1 Independientemente del diseño del alerón, el ángulo de ataque que genera una mínima sustentación está entre 40° y 60° .
- 2 Los resultados obtenidos son similares a los diseños de los alerones traseros reales de la Fórmula 1. Por tanto, la metodología utilizada es de interés.

Conclusiones y futuro trabajo

● Conclusiones

- 1 Independientemente del diseño del alerón, el ángulo de ataque que genera una mínima sustentación está entre 40° y 60° .
- 2 Los resultados obtenidos son similares a los diseños de los alerones traseros reales de la Fórmula 1. Por tanto, la metodología utilizada es de interés.

● Futuro trabajo

- 1 Realizar los estudios considerando un fluido turbulento, aproximándonos más a la realidad.
- 2 Buscar el diseño óptimo del alerón considerando el modelo en tres dimensiones.
- 3 Incluir en el alerón el sistema DRS (*Drag Reduction System*), que permita al monoplaza reducir las resistencia.

Conclusiones y futuro trabajo

● Conclusiones

- 1 Independientemente del diseño del alerón, el ángulo de ataque que genera una mínima sustentación está entre 40° y 60° .
- 2 Los resultados obtenidos son similares a los diseños de los alerones traseros reales de la Fórmula 1. Por tanto, la metodología utilizada es de interés.

● Futuro trabajo

- 1 Realizar los estudios considerando un fluido turbulento, aproximándonos más a la realidad.
- 2 Buscar el diseño óptimo del alerón considerando el modelo en tres dimensiones.
- 3 Incluir en el alerón el sistema DRS (*Drag Reduction System*), que permita al monoplaza reducir las resistencia.

Conclusiones y futuro trabajo

● Conclusiones

- 1 Independientemente del diseño del alerón, el ángulo de ataque que genera una mínima sustentación está entre 40° y 60° .
- 2 Los resultados obtenidos son similares a los diseños de los alerones traseros reales de la Fórmula 1. Por tanto, la metodología utilizada es de interés.

● Futuro trabajo

- 1 Realizar los estudios considerando un fluido turbulento, aproximándonos más a la realidad.
- 2 Buscar el diseño óptimo del alerón considerando el modelo en tres dimensiones.
- 3 Incluir en el alerón el sistema DRS (*Drag Reduction System*), que permita al monoplaza reducir las resistencia.

Conclusiones y futuro trabajo

● Conclusiones

- 1 Independientemente del diseño del alerón, el ángulo de ataque que genera una mínima sustentación está entre 40° y 60° .
- 2 Los resultados obtenidos son similares a los diseños de los alerones traseros reales de la Fórmula 1. Por tanto, la metodología utilizada es de interés.

● Futuro trabajo

- 1 Realizar los estudios considerando un fluido turbulento, aproximándonos más a la realidad.
- 2 Buscar el diseño óptimo del alerón considerando el modelo en tres dimensiones.
- 3 Incluir en el alerón el sistema DRS (*Drag Reduction System*), que permita al monoplaza reducir las resistencia.