



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (I.C.A.I.)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA AERODINÁMICA EN
CILINDROS DE SECCIÓN SEMICIRCULAR A TRAVÉS DEL USO
DE MECANISMOS PASIVOS DE CONTROL DEL FLUJO

Autor

Julen Vega Apezetxea

Director de proyecto

Leonardo P. Chamorro

Madrid

Mayo 2016

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Julen Vega Apezetxea

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: *Reducción de la resistencia aerodinámica en cilindros de sección semicircular a través del uso de mecanismos pasivos de control del flujo*, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.


6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 16 de JUNIO de 2016

ACEPTA



Fdo: Julen Vega Apezetxea

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título **Reducción de la resistencia aerodinámica en cilindros de sección semicircular a través del uso de mecanismos pasivos de control del flujo** en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2015-2016 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Julen Vega Apezetxea

Fecha: 16./06./2016

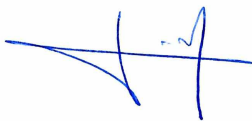
Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Leonardo P. Chamorro

15 Junio 2016
Fecha:/...../.....

Vº Bº del Coordinador de Proyectos



Fdo.: José Ignacio Linares Hurtado

Fecha: 16./6./2016



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (I.C.A.I.)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA AERODINÁMICA EN
CILINDROS DE SECCIÓN SEMICIRCULAR A TRAVÉS DEL USO
DE MECANISMOS PASIVOS DE CONTROL DEL FLUJO

Autor

Julen Vega Apezetxea

Director de proyecto

Leonardo P. Chamorro

Madrid

Mayo 2016

REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA AERODINÁMICA EN CILINDROS DE SECCIÓN SEMICIRCULAR A TRAVÉS DEL USO DE MECANISMOS PASIVOS DE CONTROL DEL FLUJO

Autor: **Vega Apezetxea, Julen.**

Director: **Chamorro, Leonardo P.**

Entidad Colaboradora: **University of Illinois at Urbana-Champaign.**

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción

Durante la última década, la reducción de la fuerza de arrastre generada sobre cuerpos romos tras el paso de un flujo turbulento se ha situado a la cabeza de los estudios en centros de investigación, desarrollo e innovación de diversas industrias en todo el mundo. Existe una gran amplitud de estudios del flujo sobre cuerpos, véase, desde el estudio de la estabilidad de rascacielos o edificios que superan cierta altura y los efectos de la estela generada por el viento ^[5, 7]; hasta la mejora en la eficiencia aerodinámica de vehículos terrestres, aéreos o marítimos ^[1, 2, 3]. En este último caso, la mejora en la eficiencia dada a la aerodinámica ha crecido de manera constante desde 1979, cuando la segunda crisis del petróleo sufrida en Estados Unidos desembocó en un necesario ahorro de combustible pues todo gasto innecesario era fuertemente penalizado. Como consecuencia, se llevaron a cabo enormes avances en el campo de la aerodinámica debido a su impacto directo en el combustible consumido por el vehículo. Tal y como se explica en Hucho et al. ^[6], las fuerzas aerodinámicas de arrastre son responsables del ~14% del combustible total consumido en el caso de vehículos medianos circulados por carreteras urbanas, mientras que este protagonismo asciende al ~46% del consumo total de combustible en caso de que se circule en carreteras de alta velocidad (autopistas o autovías).

La fuerza de arrastre puede dissociarse en dos componentes, una primera componente debida a la fricción del flujo constituyente del medio sobre el cuerpo y una segunda componente relativa a la presión que dicho flujo ejerce sobre el cuerpo en cuestión. Es pues, esta segunda componente, aquella que afecta mayoritariamente a la fuerza de arrastre total sobre el cuerpo en vehículos terrestres. Dentro de los factores que afectan al valor de la fuerza de arrastre por presión en un cuerpo, el área frontal y su contorno son los principales aspectos a tener en cuenta. Teniendo en cuenta que los espejos laterales suponen cerca de un 0,5% de dicha superficie frontal, su efecto asciende hasta el 10% ^[4].

En esta investigación se aborda el problema con un enfoque esencialmente de dos dimensiones donde un cilindro de sección semicircular supondrá el objeto base utilizado a lo largo de esta tesis debido a su gran similitud y capacidad de extrapolación de los resultados

obtenidos. Así, el estudio de los efectos de la estela generada por el fluido (en este caso aire) tras sumergir el objeto en una corriente continua, podrán ser analizados para más adelante comprobar los resultados de aplicar mecanismos de control pasivo del flujo que permitan mejorar la respuesta aerodinámica del objeto a través de una reducción en la fuerza de arrastre generada.

2. Metodología

Tal y como se ha comentado, en la presente investigación se han llevado a cabo diferentes ensayos en los que distintos mecanismos pasivos de control del flujo han sido instalados sobre un mismo cuerpo base para, de esta manera, poder comparar las variaciones del comportamiento del fluido en cada uno de los casos una vez definido el caso base (Figura 1a)) y caracterizado el flujo alrededor del mismo.

Estos mecanismos pueden ser fácilmente divididos en diversos grupos en función de sus características y propiedades: aletas rígidas de diversas longitudes ($l/d_c = 1$, $l/d_c = 1/3$ y $l/d_c = 1/4$), aletas flexibles de longitud $l/d_c = 1$ y $l/d_c = 1/3$ y ranura longitudinal. Con estos ensayos se busca evaluar el efecto de la longitud y la rigidez de las aletas en el resultado, a la vez que el efecto de la ranura en la alteración del flujo en la zona inmediatamente posterior al cuerpo.

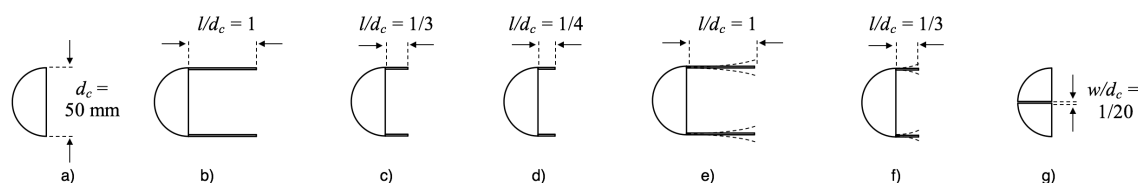


Figura 1. Mecanismos pasivos ensayados a) Cuerpo base; b) Aletas rígidas de $l/d_c = 1$; c) Aletas rígidas de $l/d_c = 1/3$; d) Aletas rígidas de $l/d_c = 1/4$; e) Aletas flexibles de $l/d_c = 1$; f) Aletas flexibles de $l/d_c = 1/3$ y g) Ranura longitudinal

Para la elaboración de los mecanismos pasivos se procedió a la selección de aquellos materiales que confiriesen las propiedades deseadas a cada uno de ellos. De esta manera, se seleccionó un material con elevadas valores de Módulo de rigidez (G) y Módulo de Young (E) para la elaboración tanto del cuerpo como de las aletas rígidas. Para ello, el plástico acrílico fue seleccionado. Finalmente, para la elaboración de las aletas flexibles se optó por el caucho natural, esto es, un material con gran flexibilidad y capaz de moverse con la acción del flujo al pasar a través del cuerpo.

En lo que a los instrumentos utilizados para la elaboración de los ensayos se refiere, se hizo uso de un túnel de viento tipo Eiffel y un equipo de medición por velocímetro por imágenes de partícula (PIV - Particle Image Velocimetry), que consta de una cámara y un láser utilizado para iluminar el campo de visión. Finalmente, se utilizó el software de PIV

para el post-procesado de los datos, a la vez que Matlab, Techplot y otras para su análisis. La predisposición de la zona de ensayos puede observarse en la Figura 2.

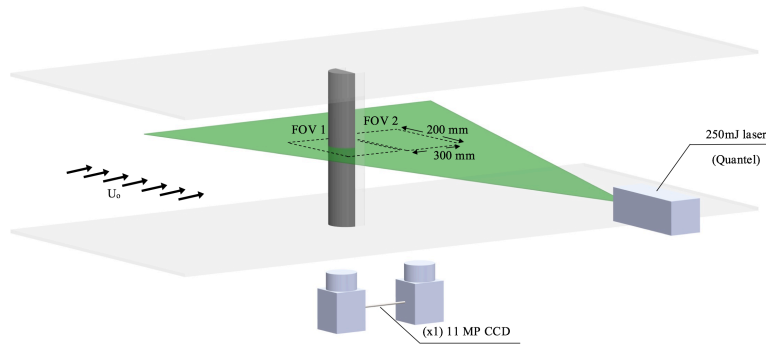


Figura 2. Disposición de la zona de ensayos

3. Resultados

Una vez realizados los diferentes ensayos propuestos, se llevó a cabo una evaluación y análisis de cuatro variables diferentes: velocidad media del flujo en la dirección de la corriente (U), la velocidad media en el sentido perpendicular al movimiento del flujo libre (V), la energía cinética turbulenta (TKE – Turbulent Kinetic Energy) y los esfuerzos turbulentos en dirección normal a la pared ($u'v'$). De esta manera y tal y como se ha explicado anteriormente, se realizó una primera caracterización del flujo bidimensional del caso base para, posteriormente, proceder con el análisis comparativo de cada ensayo. De entre las variables estudiadas, U es de las más importantes pues es aquella utilizada para calcular la reducción en la fuerza de arrastre de cada mecanismo. Para su cálculo se utilizó el método de momentos, el cual compara datos de las velocidades aguas arriba y aguas abajo del objeto en cuestión (Eq.1) a lo largo de todo el perfil de velocidades.

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho AU_0^2}; \quad D = \rho \int_{-\infty}^{\infty} U(U_0 - U)dy \quad (1)$$

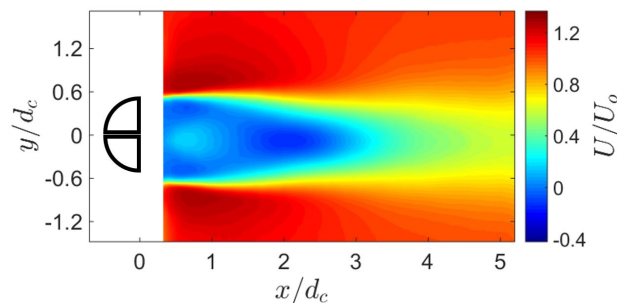


Figura 3. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre en el mecanismo de ranura longitudinal

Para poder llevar a cabo el cálculo fue necesario añadir un análisis unidimensional del perfil de velocidad ofrecido por cada ensayo a partir del que se elaboró una gráfica con las

diferentes contribuciones a la fuerza de arrastre de cada ensayo (Figura 4), y se evaluó la variación de C_d respecto al caso base (Tabla 1).

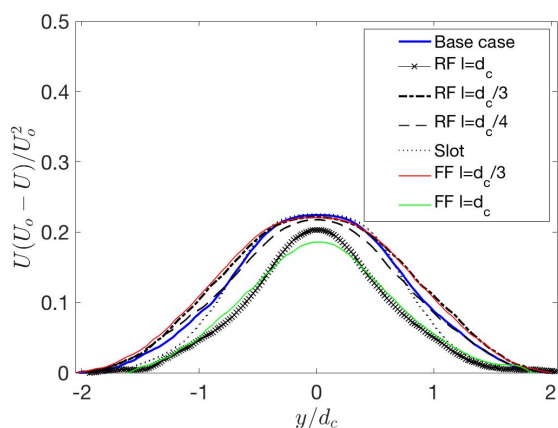


Figura 4. Contribución en el drag de cada punto

Tabla 1. Coeficiente aerodinámico

Mecanismo pasivo	C_d/C_{base}	% Red.
Caso base	1,000	0,0%
AR ($l/d_c = 1$)	0,692	30,8%
AR ($l/d_c = 1/3$)	1,077	-7,7%
AR ($l/d_c = 1/4$)	0,976	2,4%
AF ($l/d_c = 1$)	0,704	29,6%
AF ($l/d_c = 1/3$)	1,092	-9,2%
Ranura	0,939	6,1%

Tal y como se observa, el mecanismo que mayor reducción de la fuerza de arrastre propone es el de aletas rígidas de longitud, $l/d_c = 1$, tal y como se había previsto tras el análisis de las gráfica previa (Figura 4). Esta reducción del 30,8% va estrechamente seguida de la reducción propuesta por el mecanismo de aletas flexibles de igual longitud (29,6%). Además, se observa como los mecanismo por aletas de longitud $l/d_c = 1/3$ empeoran el resultado del caso base mientras que el mecanismo por aletas de longitud $l/d_c = 1/4$ tan sólo otorga una ligera reducción del 2,4%. Finalmente, el mecanismo por ranura longitudinal proporciona una mejora del 6,1% respecto al caso base, dada la estrechez en la base del perfil de contribución al arrastre.

Desde el punto de vista económico, se llevó a cabo un análisis de la rentabilidad asociada a la instalación de los diferentes dispositivos en una flota media de 40.000 vehículos. Dado que se trata de un punto de partida para la investigación en esta aplicación, los datos utilizados y sus posteriores resultados son sólo una estimación de los que un mecanismo adaptable a un vehículo y con las mismas respuestas aerodinámicas ofrecería. Dicho esto, se evaluó los costes de implantación asociados a cada ensayo (aprovisionamiento, distribución, etc.), y se compararon con los ingresos o ahorros que cada ensayo proporcionaría (Figura 5).

Paralelamente, se elaboró un análisis de las emisiones que el ensayo con mejores prestación supondría si se llevase a cabo dicha implantación. De esta manera, la reducción del coeficiente aerodinámico proporcionada por el mecanismo de aletas rígidas de $l/d_c = 1$ se tradujo a la reducción en potencia utilizada para propulsar el vehículo y, a su vez, las emisiones evitadas en esa propulsión (Tabla 2).

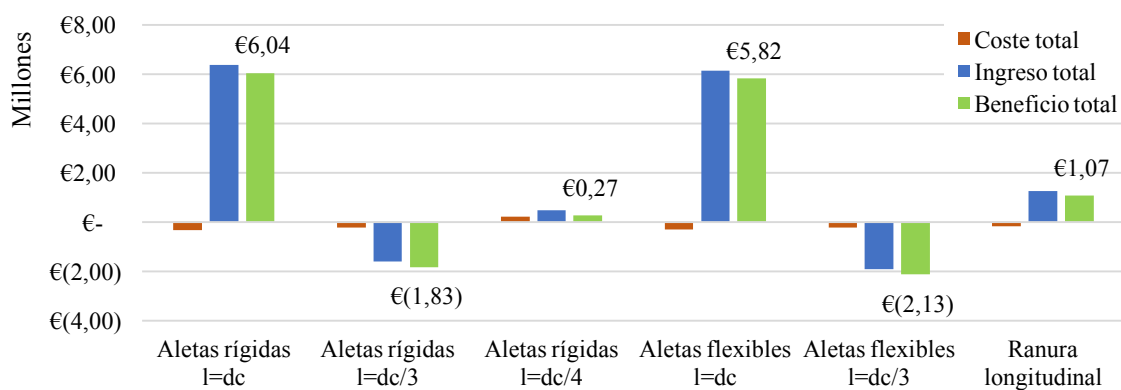


Figura 5. Resumen del análisis económico

Tabla 2. Evaluación de emisiones de 40.000 vehículos

Media de emisiones (g CO ₂ /L)	2.506,09
% Ahorro de carburante	1,41%
Ahorro de emisiones por litro (g CO ₂ /L)	35,46
Consumo carburante (L/100km)	5,00
Ahorro de emisiones por km (g CO ₂ /km)	1,77
Km por vehículo al año	9.928,00
Ahorro anual de emisiones por vehículo (kg CO₂)	17,60
Ahorro anual de la flota de vehículos (Ton CO₂)	704,07
Ahorro en vida de la flota de vehículos (Ton CO₂)	9.857,05

4. Conclusiones

Tal y como se ha podido comprobar a través de las diferentes gráficas y tablas mostradas, de entre los mecanismos ensayados destaca aquél de aletas rígidas de longitud $l/d_c = 1$, quien ofrece una reducción superior al 30% en el coeficiente aerodinámico. Desde el punto de vista de la alteración del flujo alrededor del cuerpo dados los distintos mecanismos, se ha podido observar cómo los mecanismos por aletas flexibles han demostrado pocas diferencias con sus análogos rígidos. La causa de este hecho puede estar en la necesidad de menores espesores que favoreciesen el aleteo, entre otras.

Dado que, tal y como se ha mostrado, los costes asociados a la implantación del mecanismo son prácticamente despreciables frente a los ingresos que la reducción impone, el mecanismo que mayor reducción impone ofrece mayores beneficios económicos. Lo mismo ocurre con el caso de las emisiones ya que estas sólo dependen del porcentaje de reducción y no de un coste asociado al mecanismo. Asimismo, para evaluar correctamente las emisiones evitadas, habría que considerar el ciclo de vida completo del mecanismo, desde su creación hasta su desecho. Sin embargo, tal y como se ha dicho, este es un primer análisis que responde a la evaluación de lo que puede ser un primer paso en esta línea de investigación.

DRAG FORCE REDUCTION OF SEMI-CIRCULAR CYLINDERS WITH PASSIVE FLOW CONTROL MECHANISMS

SUMMARY OF THE PROJECT

1. Introduction

For the last decade, drag forces reduction has been on top of R&D studies for the last ten years as a part in the field of discrete bluff bodies' analysis when a turbulent flow past around. Several studies have been focused in this issue, i.e. the stability of tall buildings ^[5, 7] or or vehicle's aerodynamic efficiency ^[1, 2, 3]. The last one has been continuously improved since 1979, when the second oil crisis occurred in the United States and where any waste of fuel was strongly penalized. Therefore, great advances have been achieved in the aerodynamic area due to the direct large impact over the fuel consumption. As explained in Hucho, W. H. and Sovran ^[6], drag forces are responsible for 14% of the total vehicle fuel consumption for midsize car for urban schedule and 46% in highway schedule's case.

Drag forces can be also disaggregated in a friction component due to the friction between the flow and the body; and a pressure component caused by the relative pressure force that the body suffers when the flow past around it. Nevertheless, the pressure drag force the one who mainly affects the total drag effect in common bluff bodies whereas aircrafts and ships are mainly affected by the friction drag force. Due to the strong effect of the pressure drag component in bluff bodies, its front area and its outline are the principal responsible for the final value of this force. This is the reason why outside mirrors consequences affects considerably the aerodynamic coefficient of the whole vehicle. On account of their windowsill position, a non-negligible wake is produced whose derivate effects may rise up to 10% of the total vehicle drag ^[4]. Keeping in mind the fact that side mirrors surface represents around 0,5% of the whole surface, their influence is relatively worthy of consideration.

Therefore, this investigation follows the tow-dimensional approach where a semi-circular cylinder will be the base body due to the high-level of similarities and the obtained result's extrapolation. Thus, the study of the flow's wake effect around the bluff body will be analyzed and compared with the behavior obtained after the implementation of the different passive mechanisms, aiming to improve this behavior thus reducing the drag force.

2. Methodology

As has been commented, different experiments have been developed through the investigation where diverse passive flow control mechanisms have been implemented over the same base body (Figure 7) in order to compare the variations that each mechanism produces in the flow once the base case has been properly characterized.

The mechanisms applied can be easily classified in three different groups by their properties: different length rigid flaps ($l/d_c = 1$, $l/d_c = 1/3$ and $l/d_c = 1/4$), different length flexible flaps ($l/d_c = 1$ y $l/d_c = 1/3$) and a slotted aeration throughout the whole cylinder's length.

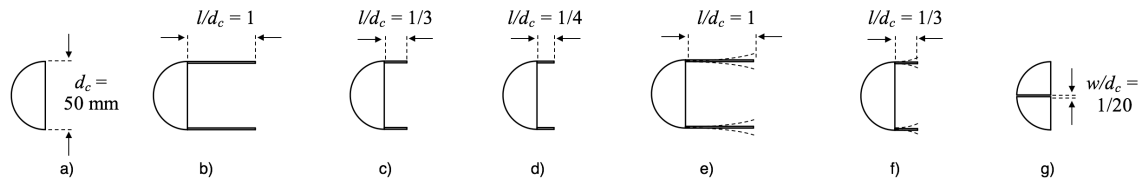


Figure 6. Passive mechanisms a) Base body; b) Rigid flaps $l/d_c = 1$; c) Rigid flaps $l/d_c = 1/3$; d) Rigid flaps $l/d_c = 1/4$; e) Flexible flaps $l/d_c = 1$; f) Flexible flaps $l/d_c = 1/3$ and g) Slot

To manufacture the passive mechanisms, different materials were selected in order to confer the desired properties to the mechanisms. Thus, high values in the Young's Modulus and the Rigid Modulus were essential for the base body and the rigid flaps, so acrylic plastic was selected for them. On the other hand, natural rubber was selected as the material for the flexible flaps due to its great flexibility features.

In order to develop the measurements, different tools were used. First of all, the experiments were performed into an Eiffel type wind tunnel, and PIV (Particle Image Velocimetry) software was implemented to elaborate the measurements desired. This method requires a camera and a laser to illuminate the field of view. Thereafter, PIV software was used to perform the post-processing. In addition, Matlab, Techplot and some other software were used to post-process the data collected. The experimental set-up is drafted in Figure 7.

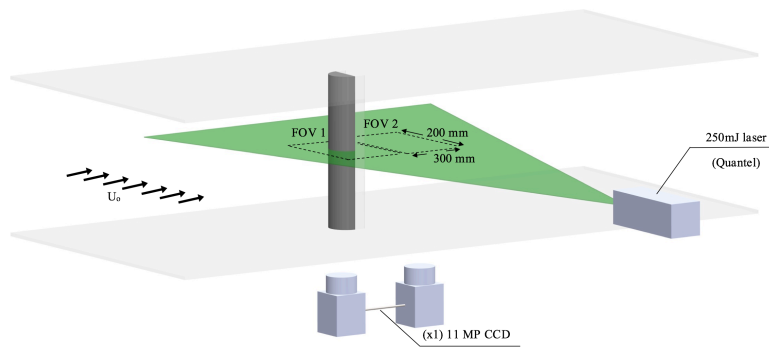


Figure 7. Experimental set-up

3. Results

Once the experiments have been performed, the evaluation and analysis of the data collected was elaborated. Four were the variables obtained afterwards: mean velocity in the stream-wise direction (U), mean velocity in the span-wise direction (V), turbulent kinetic energy (TKE) and shear stress ($u'v'$). As explained before, a previous characterization of the bi-dimensional flow around the base body was developed, followed by a comparative analysis with the rest of cases. Among the variables studied, the mean velocity in the stream-wise direction is probably the most important one because is the one used to develop the drag of each mechanism. The momentum method was selected to this analysis, which is based in the comparison between upwind and downwind velocities through the whole profile (Eq. 2).

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho AU_0^2}; \quad D = \rho \int_{-\infty}^{\infty} U(U_0 - U)dy \quad (2)$$

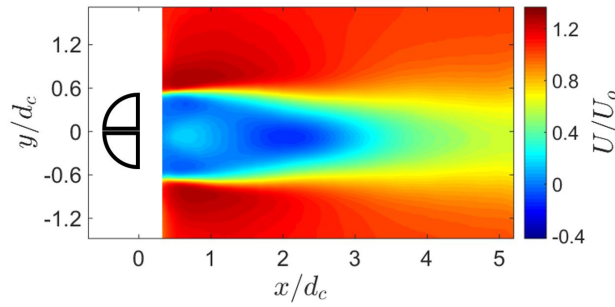


Figure 8. Mean velocity in the stream-wise direction for the slot mechanism

In order to develop the calculation, it was necessary to add a 1D analysis where the velocity profile was depicted for each experiment. Thereafter, a new graph where the drag's contribution of each point in the profile was depicted for all the mechanisms (Figure 9) and each variation was analyzed through the non-dimensional drag coefficient, C_d (Table 3).

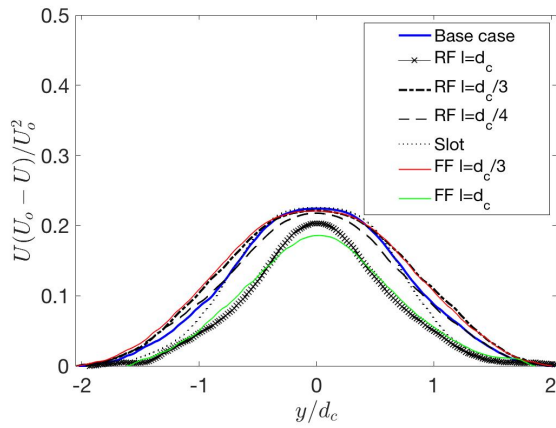


Figure 9. Drag contribution

Table 3. Drag Coefficient, C_d

Passive Mechanism	C_d/C_{base}	% Red.
Case base	1,000	0,0%
RF ($l/d_c = 1$)	0,692	30,8%
RF ($l/d_c = 1/3$)	1,077	-7,7%
RF ($l/d_c = 1/4$)	0,976	2,4%
FF ($l/d_c = 1$)	0,704	29,6%
FF ($l/d_c = 1/3$)	1,092	-9,2%
Slot	0,939	6,1%

As can be observed, the mechanism that causes the biggest drag reduction is the rigid flaps with $l/d_c = 1$, as could be noticed after the analysis of the previous figure (Figura 4). The 30.8% reduction is closely tracked by the one caused by the same length flexible flaps mechanism (29.6%). In addition, it can also be observed that both the rigid and flexible flaps mechanisms of $l/d_c = 1/3$ resulted in worse consequences. Meanwhile, the rigid flaps mechanism with the shortest length shows little improvement (only 2.4%). Finally, the slotted aeration mechanism brings up an improvement of 6.1% in relation with the base case due to the slimness in the base of its profile.

From an economic prospective, the profitability related with the installation of each mechanism into 40,000 vehicles' fleet was evaluated. Due to the fact that this thesis is only a first step in the investigation field with this application, the data used and later exposed is only an estimation of what could be achieved with an analogous mechanism whose drag reductions would be comparable to the ones achieved here. For the economic analysis, the implementation costs related with each mechanism were evaluated (picking, delivery, etc.) and compared with the corresponding income (Figure 10).

At the same time, an emissions analysis was also performed with the mechanism that showed better results in case that the mentioned implementation was carried. Therefore, the drag coefficient reduction in the rigid flaps with $l/d_c = 1$ mechanism was translated to the power reduction and, consequently, in the corresponding emissions avoidance (Table 4).

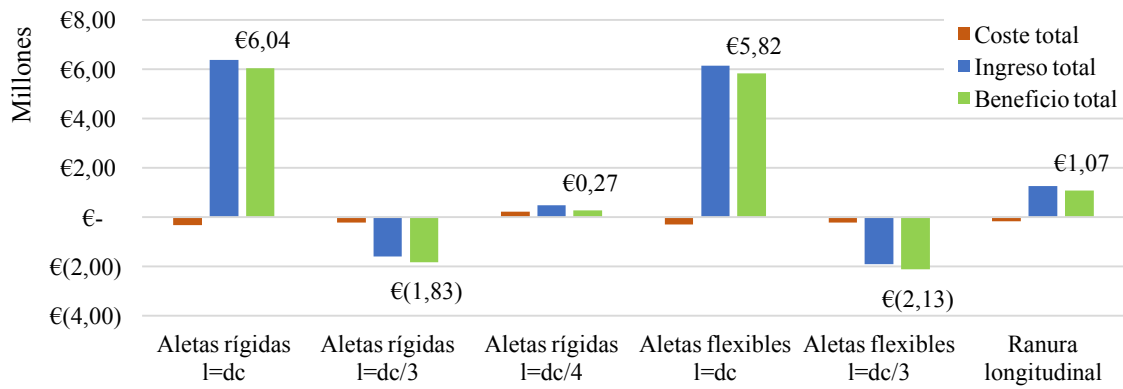


Figure 10. Economic analysis brief

Table 4. Emissions evaluation for a 40,000 fleet

Emissions average (g CO ₂ /L)	2.506,09
% Fuel reduction	1,41%
Emissions avoidance per liter (g CO ₂ /L)	35,46
Fuel consumption (L/100km)	5,00
Emissions avoidance per km (g CO ₂ /km)	1,77
Km per vehicle and year	9.928,00
Yearly emissions avoidance per vehicle (kg CO₂)	17,60
Yearly emissions avoidance per fleet (Ton CO₂)	704,07
Life emissions avoidance per fleet (Ton CO₂)	9.857,05

4. Conclusions

As can be verified through the graphics and tables shown, the mechanism with better performance is the one with rigid flaps of $l/d_c = 1$. This mechanism shows more than 30% reduction in the drag coefficient. From the fluid behavior prospective, the behavior observed with the flexible flaps is extremely similar to the behavior with rigid flaps, which could be caused by the necessity of lower values of the flaps width that helps the movement, thus the mixture of the downstream flow.

On the other hand, due to the fact that the income values are much higher than the cost level of values, the drag reduction mainly defines the profitability of the mechanism. Hence, the higher is the drag reduction, the higher is the benefit obtained, no matter the amount of material used. From the emissions prospective, the same happens because the avoidance is only dependent on the drag reduction percentage and no additional costs are associated to the mechanism. Additionally, in order to correctly analyze the emissions avoidance, the whole life-cycle of the mechanism should be considered, from its conception to its end. Nevertheless, as has been argued before, this is only a first analysis step that gives answer to the evaluation of what could be achieved, aiming to be the first step in this line of investigation.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (I.C.A.I.)
MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA AERODINÁMICA EN
CILINDROS DE SECCIÓN SEMICIRCULAR A TRAVÉS DEL USO
DE MECANISMOS PASIVOS DE CONTROL DEL FLUJO

Autor

Julen Vega Apezetxea

Director de proyecto

Leonardo P. Chamorro

Madrid

Junio 2016

Índice general

Índice general	3
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas	8
Capítulo 1	11
<i>Introducción</i>	11
1.1 Motivación	11
1.2 Objetivos	13
1.3 Estructura	15
Capítulo 2	19
<i>Estado del Arte</i>	19
2.1 Métodos de Control del Flujo.....	21
2.1.1 Mecanismos Activos de Control del Flujo.....	23
2.1.2 Mecanismos Pasivos de Control del Flujo	24
Capítulo 3	27
<i>Ensayos</i>	27
3.1 Mecanismos pasivos ensayados	27
3.1.1 Mecanismo por aletas rígidas	27
3.1.2 Mecanismo por aletas flexibles	29
3.1.3 Mecanismo por ranura longitudinal	30
3.2 Selección de los materiales.....	31
3.2.1 Cuerpo	31
3.2.2 Mecanismos pasivos	38
3.3 Características de la zona de ensayo	43
3.3.1 Túnel de viento.....	43
3.3.2 Caracterización del flujo de entrada.....	45
3.4 Instrumentación utilizada	46
3.5 Ensayos.....	48

3.5.1	Primer grupo de ensayos: Ensayo 1	48
3.5.2	Segundo grupo de ensayos: Ensayos 2, 3 y 4	49
3.5.3	Tercer grupo de ensayos: Ensayos 5 y 6	51
3.5.4	Cuarto grupo de ensayos: Ensayo 7	51
Capítulo 4	.....	55
	<i>Análisis de los datos y resultados</i>	55
4.1	Resultados y caracterización del caso base	55
4.2	Velocidad media en dirección paralela al flujo libre.....	57
4.3	Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre	59
4.4	Energía cinética turbulenta	61
4.5	Esfuerzos turbulentos	64
4.6	Fuerza de arrastre	65
Capítulo 5	.....	69
	<i>Análisis de viabilidad económica y cálculo de emisiones</i>	69
5.1	Análisis económico	70
5.5.1	Costes de implantación de cada mecanismo	70
5.5.2	Ingresos obtenidos tras la implantación del mecanismo	73
5.5.3	Balance neto de la implantación	76
5.2	Análisis de emisiones	79
Capítulo 6	.....	83
	<i>Conclusiones</i>	83
Referencias	.....	87
Anexos	.....	91
	<i>Anexo A: Velocidad media en dirección paralela al flujo libre</i>	91
	<i>Anexo B: Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre</i>	93
	<i>Anexo C: Energía cinética turbulenta</i>	95
	<i>Anexo D: Esfuerzos turbulentos</i>	97
	<i>Anexo E: Análisis económico</i>	99

Índice de Figuras

Figura 1. Adaptación de la aviación en vehículos terrestres ^[26]	20
Figura 2. Aplicación del Streamlining ^[26]	20
Figura 3. Clasificación de los mecanismos de control del flujo ^[36]	24
Figura 4. Mecanismo de capa porosa ^[4]	26
Figura 5. Mecanismo de aletas en parte trasera ^[10]	26
Figura 6. Mecanismo de perforación doble con inclinación ^[9]	26
Figura 7. Efecto de la relación entre áreas frontal y transversal del cuerpo ensayado en a) el coeficiente aerodinámico y b) la distribución entre resistencia por fricción y por presión ^[33]	29
Figura 8. Mecanismos pasivos ensayados a) Cuerpo base; b) Aletas rígidas de $l/d_c = 1$; c) Aletas rígidas de $l/d_c = 1/3$; d) Aletas rígidas de $l/d_c = 1/4$; e) Aletas flexibles de $l/d_c = 1$; f) Aletas flexibles de $l/d_c = 1/3$ y g) Ranura longitudinal	30
Figura 9. Contribución de los principales materiales en un vehículo ^[39]	32
Figura 10. Módulo de Young por tipo de plástico ^[21]	33
Figura 11. Módulo de Rigidez por plástico ^[21]	34
Figura 12. Relación porcentual de costes	34
Figura 13. Resultados de la matriz de decisión para plásticos	36
Figura 14. Cuerpo base en plástico acrílico	38
Figura 15. Aletas rígidas de plástico acrílico	39
Figura 16. Comparación del Caucho Natural (NR) con la media	41
Figura 17. Puntuación ponderada conjunta de cada material	42
Figura 18. Aletas flexibles de Caucho	42
Figura 19. Planta y alzado del túnel de viento Eiffel, dimensiones y zonas características	44
Figura 20. Disposición de la zona de ensayos	48
Figura 21. Diagrama de Flujo del procedimiento de ensayos	53
Figura 22. Caracterización de caso base según su a) Velocidad media en dirección al flujo libre; b) Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre; c) Energía cinética turbulenta y d) Esfuerzo turbulento	56

Figura 23. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre, U; a1) Aletas rígidas de $x/d_c = 1$; b1) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/3$; c1) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/4$ y d1) Ranura longitudinal.....	57
Figura 24. Perfil de velocidades de la línea central para cada uno de los mecanismos representativos	59
Figura 25. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre, U; a2) Aletas rígidas de $x/d_c = 1$; b2) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/3$; c2) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/4$ y d2) Ranura longitudinal	60
Figura 26. Perfil de velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre a una distancia $x/d_c = 5$	61
Figura 27. Energía cinética turbulenta; a3) Aletas rígidas de $x/d_c = 1$; b3) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/3$; c3) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/4$ y d3) Ranura longitudinal	62
Figura 28. Perfil de TKE a lo largo de la línea central del campo de visión	63
Figura 29. Esfuerzos turbulentos en dirección normal a la pared; a4) Aletas rígidas de $x/d_c = 1$; b4) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/3$; c4) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/4$ y d4) Ranura longitudinal.....	64
Figura 30. Perfil de velocidad media a $x/d_c = 4,5$	66
Figura 31. Contribución en el drag de cada punto	67
Figura 32. Coste total de implantación por mecanismo.....	73
Figura 33. Ingreso total de implantación por mecanismo.....	76
Figura 34. Balance de ingresos y costes por mecanismo.....	78
Figura 35. Resumen del análisis económico.....	79
Figura 36. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre para aletas rígidas de $l/d_c = 1$	91
Figura 37. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre para aletas rígidas de $l/d_c = 1/3$	91
Figura 38. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre para aletas rígidas de $l/d_c = 1/4$	91
Figura 39. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre para aletas flexibles de $l/d_c = 1$	92
Figura 40. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre para aletas flexibles de $l/d_c = 1/3$	92

Figura 41. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre para ranura longitudinal	92
Figura 42. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre para aletas rígidas de $l/d_c = 1$	93
Figura 43. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre para aletas rígidas de $l/d_c = 1/3$	93
Figura 44. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre para rígidas de $l/d_c = 1/4$	93
Figura 45. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre para aletas flexibles de $l/d_c = 1$	94
Figura 46. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre para aletas flexibles de $l/d_c = 1/3$	94
Figura 47. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre para ranura longitudinal	94
Figura 48. Energía cinética turbulenta para aletas rígidas de $l/d_c = 1$	95
Figura 49. Energía cinética turbulenta para aletas rígidas de $l/d_c = 1/3$	95
Figura 50. Energía cinética turbulenta para rígidas de $l/d_c = 1/4$	95
Figura 51. Energía cinética turbulenta para aletas flexibles de $l/d_c = 1$	96
Figura 52. Energía cinética turbulenta para aletas flexibles de $l/d_c = 1/3$	96
Figura 53. Energía cinética turbulenta para ranura longitudinal.....	96
Figura 54. Esfuerzos turbulentos para aletas rígidas de $l/d_c = 1$	97
Figura 55. Esfuerzos turbulentos para aletas rígidas de $l/d_c = 1/3$	97
Figura 56. Esfuerzos turbulentos para rígidas de $l/d_c = 1/4$	97
Figura 57. Esfuerzos turbulentos para aletas flexibles de $l/d_c = 1$	98
Figura 58 Esfuerzos turbulentos para aletas flexibles de $l/d_c = 1/3$	98
Figura 59. Esfuerzos turbulentos para ranura longitudinal	98

Índice de Tablas

Tabla 1. Matriz de decisión para plásticos	36
Tabla 2. Comparación de características y propiedades entre el aluminio y el plástico	37
Tabla 3. Comparación de características del aluminio y del plástico	37
Tabla 4. Propiedades de los cauchos considerados.....	40
Tabla 5. Comparación de valores de Reynolds.....	45
Tabla 6. Coeficiente aerodinámico en función del mecanismo utilizado	68
Tabla 7. Análisis de costes	71
Tabla 8. Análisis de ingresos ^[4,6]	74
Tabla 9. Análisis del beneficio.....	77
Tabla 10. Evaluación de emisiones de 40.000 vehículos.....	80
Tabla 11. Ahorro CO ₂ tras escalado nacional	81
Tabla 12. Comparación del CO ₂ ahorrado con el número de árboles equivalente	82
Tabla 13. Comparación del CO ₂ ahorrado con el número de personas equivalente .	82
Tabla 14. Coste total de implantación para aletas rígidas de $x/d_c = 1$	99
Tabla 15. Coste total de implantación para aletas rígidas de $x/d_c = 1/3$	100
Tabla 16. Coste total de implantación para aletas rígidas de $x/d_c = 1/4$	100
Tabla 17. Coste total de implantación para aletas flexibles de $x/d_c = 1$	101
Tabla 18. Coste total de implantación para aletas flexibles de $x/d_c = 1/3$	101
Tabla 19. Coste total de implantación para ranura longitudinal	102
Tabla 20. Coste total de implantación para aletas rígidas de $x/d_c = 1$	103
Tabla 21. Coste total de implantación para aletas rígidas de $x/d_c = 1/3$	104
Tabla 22. Coste total de implantación para aletas rígidas de $x/d_c = 1/4$	104
Tabla 23. Coste total de implantación para aletas flexibles de $x/d_c = 1$	105
Tabla 24. Coste total de implantación para aletas flexibles de $x/d_c = 1/3$	105
Tabla 25. Coste total de implantación para ranura longitudinal	106
Tabla 26. Balance para el mecanismo de aletas rígidas de $l/d_c = 1$	107
Tabla 27. Balance para el mecanismo de aletas rígidas de $l/d_c = 1/3$	107
Tabla 28. Balance para el mecanismo de aletas rígidas de $l/d_c = 1/4$	107
Tabla 29. Balance para el mecanismo de aletas flexibles de $l/d_c = 1$	107
Tabla 30. Balance para el mecanismo de aletas flexibles de $l/d_c = 1/3$	108

Tabla 31. Balance para el mecanismo de ranura longitudinal	108
--	-----

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

Durante la última década, el estudio de las fuerzas generadas sobre un cuerpo como debido a su paso a través de un flujo de corriente laminar ha protagonizado la investigación y el desarrollo llevado a cabo en diversos sectores industriales en todo el mundo. En cada uno de los sectores, la motivación de cara a dicho estudio varía en función de la aplicación final del mismo. De esta manera, estudios fundamentales acerca del comportamiento de cuerpos inmersos en un flujo laminar han sido utilizados para aplicaciones que van desde el diseño de rascacielos o edificios que superan cierta altura y en los que la acción del fluido afecta considerablemente ^[5,7] a su posterior comportamiento, hasta la mejora de la eficiencia aerodinámica en vehículos terrestres, marítimos y aéreos ^[1,2,3]. Es sobre todo, a partir de 1979, cuando con la segunda crisis del petróleo vivida en Estados Unidos, donde el esfuerzo dedicado a la mejora de la eficiencia aerodinámica comienza a aumentar a ritmos considerables dada la fuerte penalización que suponía el gasto innecesario de combustible. Este aumento en la investigación y el desarrollo se corresponde con el gran protagonismo que la aerodinámica posee sobre el consumo de combustible y su relación con las emisiones de gases contaminantes producidos durante la combustión de los motores, cada vez más presente en la sociedad. Según el estudio emitido por la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (E.P.A.), un 27% de los gases contaminantes emitidos a la atmósfera son generados por el sector transporte ^[25].

Tal y como se explica en Hucho et al ^[6], las fuerzas aerodinámicas de arrastre son responsables del ~14% del combustible total consumido en el caso de vehículos medianos circulados por carreteras urbanas, mientras que este protagonismo asciende al ~46% del consumo total de combustible en caso de que se circule en carreteras de alta velocidad (autopistas o autovías). Por otro lado, la mejora en la eficiencia

aerodinámica de un vehículo no sólo genera beneficios en cuanto a la reducción del gasto de combustible, sino que también deriva en mejoras de su aceleración y velocidad punta ^[6].

La fuerza de arrastre (también conocida como *drag force*) puede disociarse en dos componentes, uno de ellos es aquél relacionado con la fricción existente entre el fluido que compone el medio y el objeto que lo atraviesa, y una segunda componente procedente de la diferencia de presiones que el fluido ejerce sobre la superficie del objeto. En ambas componentes las fuerzas se suceden en diferentes direcciones, sin embargo, predomina la dirección contraria al movimiento relativo del fluido sobre el cuerpo. Generalmente, la distribución de pesos entre una y otra componente sobre el valor total de la fuerza de arrastre suele inclinarse sobre la componente relacionada con la presión ya que el esfuerzo cortante es mucho menor que la diferencia de presiones debido a la existencia de desprendimiento de la capa límite. Sin embargo, este protagonismo puede variar en función de la aplicación del cuerpo. De esta manera, dada la geometría propia de vehículos marítimos y aeronaves, es la componente relativa a la fricción aquella que afecta en mayor medida al valor de la fuerza de arrastre total sufrida por el cuerpo. Sin embargo, es la componente relacionada con la presión aquella que más afecta en el valor de la fuerza de arrastre dada en vehículos terrestres y cuerpos romos, en los que una terminación obtusa da lugar al desprendimiento de la capa límite comentado ^[26].

Dentro de los factores que afectan al valor de la fuerza de arrastre, el área frontal del cuerpo, su contorno y el coeficiente de arrastre son aquellos parámetros que mayor influencia poseen ^[27]. Es por esta razón por lo que los espejos laterales juegan un papel importante en el comportamiento aerodinámico global del vehículo, suponiendo reducciones en el valor de la fuerza de arrastre que oscilan entre 2% y 10% ^[4, 52]. Teniendo en cuenta que los espejos laterales sólo representan un ~0,5% del área frontal del vehículo ^[4], son un elemento cuya influencia relativa no puede pasar inadvertida.

Debido a los factores comentados, la gran influencia que poseen los espejos laterales de los vehículos sobre la fuerza de arrastre y, consecuentemente, sobre la aerodinámica global del vehículo, en esta investigación se aborda la reducción de la fuerza de arrastre a partir de la mejora del rendimiento aerodinámico de los espejos laterales. A lo largo de esta tesis se llevará a cabo un estudio simplificado en el que un cilindro de sección semicircular supondrá el objeto base utilizado debido a su gran

similitud y capacidad de una posterior extrapolación de los resultados obtenidos. El estudio se realizará en dos dimensiones, pudiendo así considerarse como una de las secciones de un espejo retrovisor lateral y de manera que los resultados obtenidos puedan establecer un punto de partida en esta línea de investigación. Así, se estudiarán los efectos de la estela generada por el fluido (en este caso, aire) tras sumergir el objeto en una corriente continua, analizándose los datos obtenidos para más adelante poder comprobar los resultados de aplicar mecanismos pasivos de control del flujo que permitan mejorar la respuesta aerodinámica del objeto a través de una reducción en la fuerza de arrastre generada.

1.2 Objetivos

Debido a la gran repercusión que supone la aerodinámica de un vehículo en la eficiencia del mismo y, concretamente, la influencia de los espejos laterales en la reducción de la fuerza de arrastre sufrida, así como la gran cantidad de aplicaciones con geometrías similares (cilíndrica, bien de sección semicircular o circular) en el mundo real, se hace necesario un estudio que permita advertir mejoras en la respuesta aerodinámica de los cuerpos en cuestión. De esta manera, a lo largo de esta tesis se lleva a cabo el estudio de distintos mecanismos pasivos de control del flujo que permiten, de una u otra forma, reducir la fuerza de arrastre sufrida por el cuerpo ensayado a la vez que mejorar la respuesta aerodinámica del mismo a través del estudio del comportamiento del cuerpo en las condiciones sometidas. Mecanismos que, sin necesidad de una fuente externa de energía, permitan mejorar el rendimiento del objeto al que prestan servicio.

En un segundo plano, se podrá comprobar las diferencias existentes entre los distintos mecanismos de control instalados en el cuerpo de ensayo, pudiendo percibir las consecuencias de utilizar unos u otros en futuras aplicaciones.

Si bien se han estudiado una gran cantidad de mecanismos pasivos de control en la última década, lo que dota de indudable valor añadido a la tesis presentada es tanto la originalidad de los mecanismos planteados como su gran aplicabilidad a objetos de la vida real en los que las mejoras derivadas de la implantación de estos mecanismos pueden tener repercusiones ineludibles en el comportamiento del cuerpo y la consecución de los objetivos marcados. Los mecanismos de control pasivo del flujo

que son objeto de estudio de esta tesis son seis: implantación de aletas (*o flaps*) rígidas de tres longitudes diferentes, implantación de aletas flexibles de dos longitudes diferentes y, finalmente, la perforación del cuerpo base con una ranura pasante a lo largo de toda la longitud del semicilindro base.

Finalmente, la viabilidad económica del mecanismo de control óptimo constituye parte de los objetivos de la presente tesis. Así, se evaluarán los costes asociados a la construcción e implantación del mecanismo en cuestión y se enfrentarán a los ingresos que dicha implantación supone, en términos de ahorro de combustible. De esta manera, combinando la aplicación de economías de escala y un estudio exhausto de los materiales utilizados para cada uno de los mecanismos, podrá determinarse si existe rentabilidad en la operación de implantación del mecanismo o si, por el contrario, se precisa de una mayor investigación y desarrollo ya sea de los materiales utilizados para la conformación de los mecanismos de control o en las características de los mismos para la generación de un mayor porcentaje de reducción en la fuerza de arrastre.

Paralelamente al objetivo final de este proyecto, existen una serie de objetivos de carácter secundario pero fundamentales a su vez pues permiten el alcance del objetivo final comentado. Asimismo, dotan de mayor riqueza al estudio realizado a la vez que establecen una mayor integridad de lo expuesto. A continuación, se enumeran los objetivos comprendidos en esta tesis.

- Caracterización de la referencia: De cara a la observación del comportamiento del cuerpo base con uno u otro mecanismo de control, es necesario situar un punto de referencia que permita cuantificar la mejoría observada. Con este objetivo se pretende determinar el comportamiento aerodinámico del objeto romo (libre de todo mecanismo), es decir, la caracterización de los vórtices, fuerzas y la estela del cuerpo base.
- Evaluación de los mecanismos: Este objetivo permitirá observar la influencia de cada tipo de mecanismo en la aerodinámica del objeto romo. Paralelamente, este objetivo se constituye a partir de la constitución de otros objetivos de menor envergadura. Estos son:

- Optimización de la longitud: Este es un objetivo de carácter fundamental pues a través de la evaluación del comportamiento de las diferentes aletas rígidas se podrá determinar la longitud óptima de las mismas, es decir, aquella que provee una mejor respuesta aerodinámica del conjunto. De igual manera, se pretende evaluar la influencia de la longitud en el caso de mecanismos de control por aletas flexibles. De nuevo, se volverán a analizar los distintos casos ensayados y de ellos se determinará la longitud óptima para este tipo de mecanismos de control.
 - Evaluación de la flexibilidad en el comportamiento final: Una vez recogidos los resultados de la implantación de aletas rígidas y flexibles en el cuerpo base, podrá determinarse el grado de influencia de la flexibilidad de las aletas en el resultado final.
- Comparación de los distintos mecanismos: Una vez se realicen todos los ensayos, su comparación posterior permitirá seleccionar aquél que proporcione una mayor reducción en el valor de la fuerza de arrastre del cuerpo constituye el objetivo principal de la presente tesis. Para ello, se enfrentarán los resultados obtenidos con las longitudes óptimas de las aletas rígidas y flexibles y se determinará cuál de ambas ofrece un rendimiento mejor.
 - Evaluación económica del mecanismo óptimo: Tras haber realizado la comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de cada uno de los mecanismos de control, se procede a la evaluación de la viabilidad económica de aquél que presente un mayor porcentaje de reducción en la fuerza de arrastre del sistema. Así los gastos de adquisición, configuración e implantación serán contrapuestos con los ingresos (evaluados en forma de ahorro de combustible).

1.3 Estructura

La estructura de la presente tesis comienza por contextualizar el estudio principal llevado a cabo para, más adelante, proceder al estudio conciso y concreto en sí. Finalmente, se presentan los resultados y conclusiones obtenidos del mismo. De esta manera, una vez se ha llevado a cabo la introducción de la temática sobre la que esta

tesis versa y los motivos y utilidades que, desde un punto ingenieril, han llevado a la elaboración de esta investigación en un campo tan competitivo y estudiado desde hace tantos años, se explican las razones por las cuales se ha llegado a la situación actual en lo que a eficiencia aerodinámica se refiere. Esto es, aquellos avances llevados a cabo en las últimas décadas que han permitido alcanzar los niveles de eficiencia actuales. Para ello, se procederá a comentar dicha evolución a partir de la exposición y descripción de los mecanismos utilizados para reducir la fuerza de arrastre de los cuerpos sometidos a un flujo laminar. Tanto esto como las tendencias futuras y el estado actual de esta línea de investigación serán presentados en el Estado del Arte de esta tesis.

Una vez la investigación elaborada ha sido situada en su contexto actual, se procede a explicar cada uno de los ensayos llevados a cabo para la obtención de resultados. Sin embargo, de manera previa a la descripción de los ensayos realizados, se describirán y explicarán aquellos aspectos que afectan a los resultados posteriormente obtenidos. Así, los materiales seleccionados para conformar tanto el cuerpo base como los diferentes mecanismos son justificados desde un punto de vista tanto funcional como económico. De esta manera, se procede a explicar la sistemática utilizada para su selección.

Tras haber concretado los materiales seleccionados para elaborar los objetos y mecanismos a ensayar, se comentan las características de la zona de ensayo. Tal y como se explicará con más detalle en el correspondiente capítulo de esta tesis, los ensayos se llevan a cabo en un túnel de viento de tipo Eiffel. Para ello, se explicarán las características de los diferentes tipos de túneles de viento más utilizados en la actualidad y las razones de su uso. Además, las características concretas del fluido utilizado durante los ensayos y los detalles del flujo serán también definidos debido a su enorme repercusión en los resultados obtenidos y la capacidad de extrapolación de los mismos de cara a simular unas condiciones de operación similares a las que se sucederían en la actividad normal de la principal aplicación a la que este estudio presta servicio, la mejora de la eficiencia aerodinámica en espejos laterales.

Para terminar de dar sentido a los resultados obtenidos tras los ensayos, se explicarán los detalles de la instrumentación utilizada para obtener las medidas. Así, se explicará el Velocímetro por Imágenes de Partícula o PIV (*Particle Image*

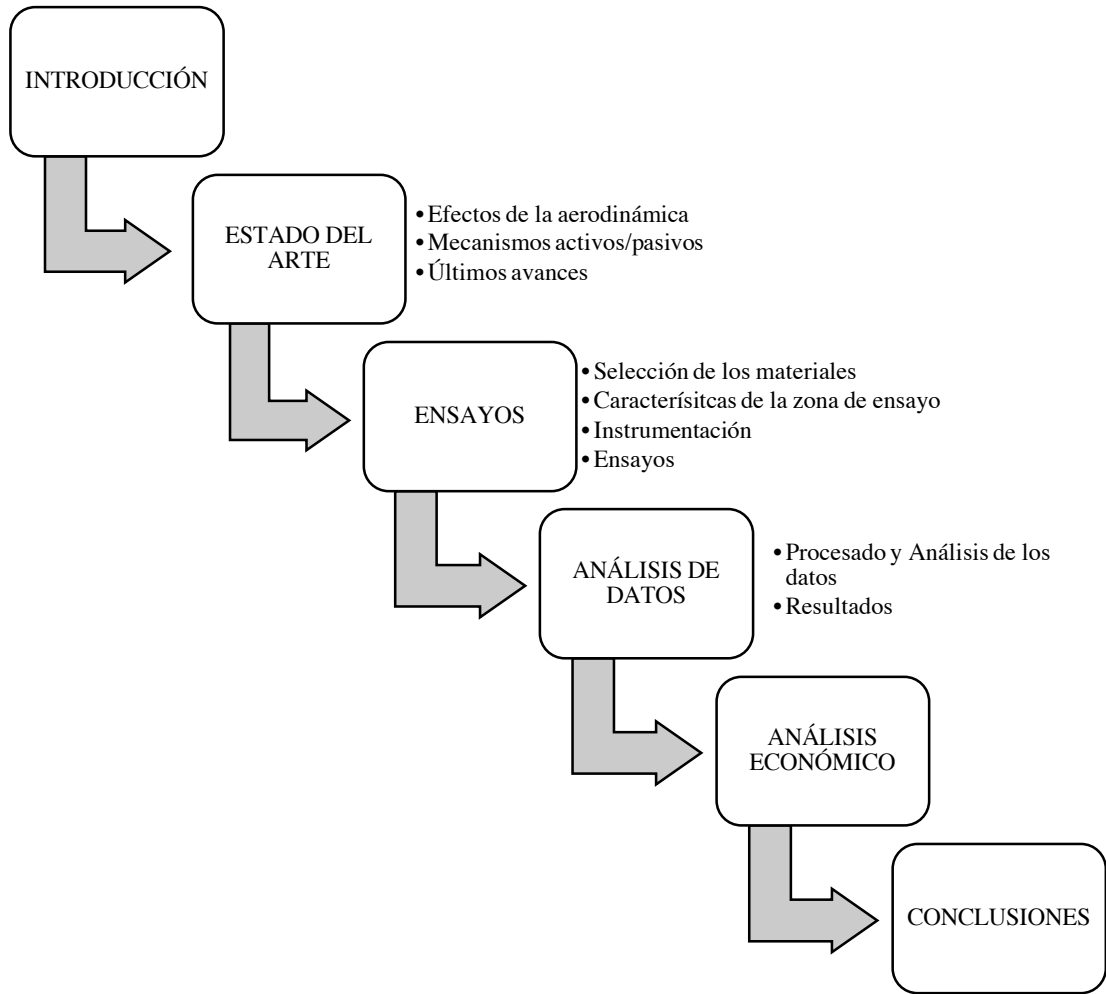
Velocimetry), describiendo su resolución y su influencia en la veracidad y precisión de los datos obtenidos.

Finalizada la descripción de aquello que acompaña la realización de los diferentes ensayos, así como de los elementos que intervienen de una u otra manera en los datos recogidos, se procede a realizar una descripción detallada de cada ensayo realizado. Así, se explicarán aquellos detalles concernientes a cada caso y se detallarán los aspectos relevantes de cada uno.

Tras la explicación detallada de cada ensayo, se procede a mostrar los datos recogidos en cada uno. De cada ensayo se realizará un filtrado de datos y un análisis de los mismos de manera que se obtengan resultados significativos de los que se pueda obtener información útil y representativa. Asimismo, los diferentes resultados y análisis serán comparados con el caso base o referencia a la vez que también se comparan entre sí, obteniendo como resultado una perspectiva global de cada uno de los mecanismos de control sobre el caso base y sobre el resto de mecanismos. Esta metodología permite evaluar los resultados y diferencias funcionales de cada uno de los mecanismos ensayados.

Una vez recogidos los resultados del análisis funcional de cada uno de los elementos de control, se llevará a cabo un análisis económico de la viabilidad de los mismos. De esta manera, se dota de una componente económica de los distintos mecanismos, permitiendo así una comparación mucho más fiable y real de los mismos, pudiendo llevar a cabo hipótesis de su implantación en el mercado y los resultados de la misma. Este otro aspecto aumenta considerablemente la riqueza del estudio realizado, otorgándole realidad e integridad además de la utilidad ingenieril que de por sí posee.

Por último, finalizada la contextualización e introducción a la presente tesis, mostrada la metodología llevada a cabo y explicados con detalle los ensayos realizados, la zona empleada con dicho propósito y los instrumentos utilizados para su análisis a la vez que realizado el análisis de viabilidad económica de este estudio, las conclusiones de lo recogido serán presentadas en el último capítulo de esta tesis de modo que el estudio adquiera integridad y alcance.



Capítulo 2

Estado del Arte

En su sentido más amplio, el control del flujo alrededor de un cuerpo ha sido practicado por el ser humano desde tiempos ancestrales en los que, de manera inherente o por necesidades primarias, se ha precisado de un mayor control sobre el objeto que atraviesa el flujo mencionado. De esta manera, objetos como lanzas, arpones o flechas se fabricaban con un contorno que actualmente se catalogaría como aerodinámico ^[28]. Asimismo, boomerangs y otros objetos han sido instintivamente contruidos de acuerdo con bases y leyes para la mejora de la eficiencia aerodinámica relativamente modernas.

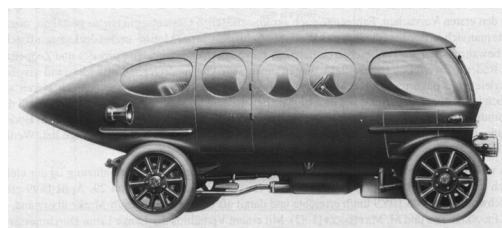
En la actualidad, los avances en aerodinámica y la mejora en su eficiencia tienen diversos objetivos en función de la aplicación a la que estén dirigidos. Con ello, la aerodinámica puede estar dirigida hacia la obtención de unas características de confort más favorables para los pasajeros de un vehículo a través de la reducción del ruido generado por movimiento relativo entre el fluido y el vehículo o, por el contrario, a la ventilación y refrigeración del habitáculo ^[26]. Por otro lado, la reducción del consumo de combustible o la mejora de las condiciones de conducción (en forma de estabilidad, seguridad y manejo) conforman objetivos reales para cuya obtención ha sido imprescindible el estudio de la aerodinámica en profundidad. Es necesario destacar que no todos estos objetivos son incompatibles entre sí, aunque lo más probable es que mientras las mejoras se centran en mejorar uno de ellos, algún otro empeore su comportamiento, por lo que habrá que lidiar con una solución intermedia ^[32].

Como resultado de dichos estudios, los vehículos terrestres han sufrido una progresiva transformación desde su aparición hasta hoy en día. Inicialmente su aerodinámica estaba situada en un segundo plano pues no se sabía de sus ventajas sobre otras aptitudes como la velocidad, aceleración o maniobrabilidad. Una vez se comenzó a indagar en dichos efectos favorecidos por la aerodinámica (primera veintena del siglo XX), se empezaron a introducir avances realizados en otros campos como la aviación ^[26] (véase Figura 1). En los siguientes cincuenta años, se continuó

con dicha progresión en la que la aerodinámica de los vehículos estaba predominantemente guiada por los avances realizados para la mejora de aviones y vehículos aéreos, dando así lugar a una tendencia llamada *streamlining*. En ella, los rasgos principales se basan en las líneas de corriente que dibuja el fluido al ser atravesado por el cuerpo (véase Figura 2). A partir de los años 70, la aerodinámica en vehículos terrestres comprendía ya un área de investigación en sí mismo. Por esta razón, los avances llevados a cabo entre 1970 y 1990 se dedicaron a la optimización de detalles de los vehículos como el área frontal, las entradas de aire, etc. Sin embargo, a partir de 1990 se comenzó a estudiar la optimización de la forma global del vehículo para la obtención de mejoras en el comportamiento aerodinámico del vehículo hasta llegar a los niveles de eficiencia actuales, en los que el coeficiente aerodinámico se sitúa cerca de $C_D = 0,189$ (Volkswagen XL1).



a) Torpedo



b) Aeronave

Figura 1. Adaptación de la aviación en vehículos terrestres [26]

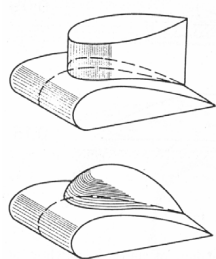


Figura 2. Aplicación del Streamlining [26]

Tal y como se ha comentado en el capítulo anterior, el efecto del área frontal de un vehículo en el valor de la fuerza de arrastre experimentada por él es considerable, y con ella la influencia relativa de los espejos laterales en dicha fuerza no puede ser despreciada. En esta investigación se aborda un punto de partida para una línea cuya aplicación final reside en la mejora del drag generado por los espejos laterales y, en

consecuencia, el drag global del vehículo. Al tratarse de una primera aproximación, se llevó a cabo el estudio bidimensional cuyo cuerpo base lo conformará un cilindro de sección semicircular que podría simular una sección simplificada de un espejo lateral. En este caso, el cilindro de sección semicircular cumple con los requerimientos para su posterior analogía con los espejos laterales de vehículos e incluso otras aplicaciones en los que esta figura conforme la silueta principal del objeto aplicación final. Asimismo, se han elaborado una gran cantidad de estudios cuyo objeto principal era un cilindro con sección semicircular o un objeto con una silueta similar (como es el caso de cuerpos con forma de D o “*D-Shaped bodies*”) [4, 11, 12, 13, 55]. Esto se debe, entre otras cosas, a la gran cantidad de aplicaciones que esta característica silueta posee y la correspondiente gran utilidad de los avances llevados a cabo puesto que los resultados obtenidos pueden extrapolarse de unos estudios a otros y, de esta manera, adaptarse según sea la aplicación final que corresponda. Por otro lado, diferentes estudios y resultados experimentales y numéricos respaldan la realización en dos dimensiones de la investigación llevada a cabo en esta tesis pues se ha confirmado el comportamiento principalmente bidimensional del flujo alrededor del objeto como en su punto de separación, esto es, en su parte trasera [8, 57]. Tal y como se explica en Bruneau, Charles-Henri, et al., el flujo que atraviesa un cuerpo de Ahmed de parte trasera cuadrada sufre un desprendimiento de capa límite en su parte trasera principalmente representada por un campo bidimensional.

2.1 Métodos de Control del Flujo

Tal y como se ha comentado, se han practicado una gran cantidad de metodologías con la intención de mejorar el comportamiento aerodinámico de un objeto sumergido en un flujo y, de igual manera, en la actualidad hay una gran cantidad de frentes abiertos que apuntan distintos métodos para mejorar uno u otro aspecto aerodinámico con el mismo fin. Uno de los métodos más considerados consiste en el uso de mecanismos de control del flujo que rodea al cuerpo en cuestión para la mejora aerodinámica del mismo. De los objetivos para los cuales se han utilizado mecanismos de control del flujo, prevalece la reducción de la fuerza de arrastre del cuerpo al que prestan servicio.

Puede afirmarse que siempre que exista movimiento relativo entre un cuerpo y el fluido en el que se encuentra sumergido, dicho cuerpo experimenta una fuerza neta resultado del movimiento relativo mencionado ^[32]. De esta manera, la componente paralela a la dirección del movimiento y contraria al sentido de movimiento del cuerpo es conocida como fuerza de arrastre, resistencia aerodinámica o *drag force*. Dicha fuerza de arrastre se debe a dos principales causas, una de ellas hace referencia a la fricción que sufre el cuerpo con el fluido y es conocida como resistencia de fricción, mientras que la segunda causa principal tiene su origen en la presión que ejerce el fluido sobre el cuerpo al ser atravesado por este, denominándose como resistencia de presión. La resistencia de fricción se define como la componente en la dirección de las líneas de corriente resultante de la integral del esfuerzo cortante a lo largo de toda la superficie del cuerpo sumergido. Por el contrario, la resistencia de presión surge debido al desequilibrio de fuerzas normales a la superficie de dicho cuerpo y, por tanto, se calcula como la componente en la dirección de las líneas de corriente que proviene de integrar dichas fuerzas normales a lo largo de la totalidad del cuerpo. El peso de una y otra componente sobre el valor de la resistencia aerodinámica del cuerpo depende principalmente de la forma del cuerpo y, más concretamente, de las dimensiones perpendiculares del cuerpo a la dirección de la corriente, es decir, su espesor ^[33].

Una de las múltiples definiciones del concepto que identifica el control del flujo de un fluido alrededor define como control del flujo a todo mecanismo o proceso a través del cual el comportamiento del flujo alrededor del cuerpo cambia respecto de su comportamiento normal, en ausencia de toda perturbación ^[35]. Tal y como puede observarse a través de los diferentes estudios realizados acerca de la mejora de controles para provocar cambios en el comportamiento del flujo, los mecanismos utilizados pueden ser diferenciados de una u otra manera en función de la diversidad de los mismo ^[36]. De esta manera, aparecen clasificaciones según la posición del mecanismo respecto del objeto (adherido a él o separado), según si el objetivo del mecanismo es directamente el cambio en el perfil de velocidad instantánea/media o si su influencia se restringe intencionadamente a la disipación de pequeños remolinos, o según las necesidades de alimentación externa del mecanismo de control. Sin embargo, es esta última clasificación la más popularmente considerada pues establece una clara división entre todos y cada uno de los grupos que conforma. Como consecuencia de

esta clasificación aparecen dos grandes tipos de mecanismos de control: activos y pasivos. La principal diferencia entre ambos mecanismos reside en la ausencia de potencia externa entregada al fluido para el correcto funcionamiento de los mecanismos de control pasivos frente a la necesidad de una u otra fuente alimentación auxiliar en el caso de los mecanismos de control activos.

2.1.1 Mecanismos Activos de Control del Flujo

Un mecanismo de control activo del flujo puede definirse como aquél mecanismo que, a través de una serie de sensores y actuadores que absorben energía a partir de una fuente de energía externa para alterar el flujo alrededor de un objeto sumergido en una corriente. Los mecanismos de control de flujo incluidos dentro de este grupo pueden a su vez ser clasificados en función de sus características, apareciendo dos grandes grupos de mecanismos activos: predeterminado y reactivo.

Los controles predeterminados son aquellos en los que la variable controlada no varía en función de la condición del flujo que lo rodea, no siendo necesaria la existencia de sensores a la vez que existe la posibilidad de que la aportación externa de energía tenga lugar de manera constante o intermitente. Es por ello que este tipo de controles no posee un lazo de control cerrado ^[36]. Consecuentemente, los controles predeterminados constituyen los mecanismos activos más simples ^[22], con las ventajas e inconvenientes que ello implica.

Por otro lado, los controles activos reactivos se caracterizan por ajustar constantemente la variable de control en función de lo medido en el flujo que rodea al cuerpo (pudiendo darse la situación en la que la variable de control y la variable medida coincidan o no). De esta manera, es necesaria la aportación constante de energía. Los controles activos reactivos pueden poseer lazos de control abiertos de prealimentación (*feed-forward*) o cerrados de realimentación (*feedback*) ^[36]. La principal característica de los controles *feed-forward* reside en la diferenciación de las variables de medida y de control. Por otro lado, las variables de control y la variable medida en un control *feedback* han de ser iguales y comparables a una referencia. Finalmente, existen cuatro categorías diferentes de controles reactivos de realimentación: adaptativos, de modelo físico, de modelo dinámico y óptimo.

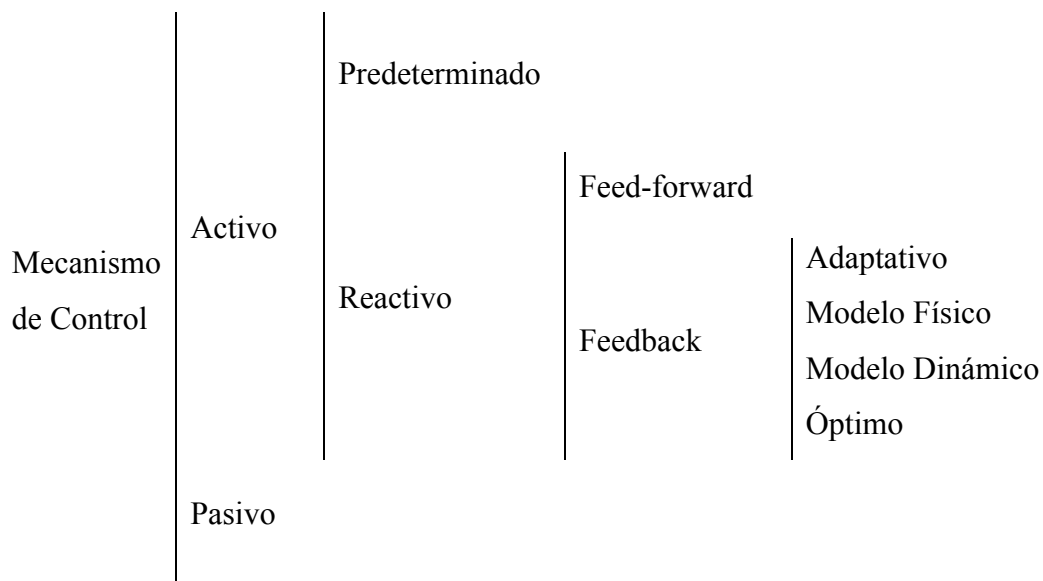


Figura 3. Clasificación de los mecanismos de control del flujo ^[36]

Existen una gran variedad de mecanismos activos de control de flujo ^[8, 22, 61, 62], aunque la gran mayoría de los mismos pasan por la vibración y la aspiración/expulsión de flujo ^[35].

2.1.2 Mecanismos Pasivos de Control del Flujo

De forma contraria a como ocurre con los mecanismos activos, los mecanismos pasivos de control del flujo poseen la ventaja de no precisar de aportación externa de potencia para ejercer su función. Un mecanismo de control pasivo se trata de elemento externo que, en función de su posición, geometría y propiedades características, es capaz de mejorar el comportamiento aerodinámico global del cuerpo ^[22].

Tras la realización de diversos estudios se ha llegado a diversas conclusiones de cara a la elección de un control activo o pasivo para reducir el drag sufrido por un cuerpo como sumergido en un flujo. Muchos de estos estudios apuntan, entre otras cosas, la gran cantidad de beneficios que los mecanismos pasivos de control poseen sobre los mecanismos activos ^[8], pudiendo agrupar los principales factores en dos grandes grupos. Uno de ellos hace referencia al coste económico de fabricación e instalación del mecanismo. Los mecanismos pasivos, al no requerir potencia adicional para su funcionamiento, suelen tener un coste que tiende a estar muy por debajo del

coste de obtención o fabricación de un control activo¹. Una de las razones principales de esto recae sobre la mayor cantidad de materiales que precisan los controles activos y la (habitualmente mayor) complejidad de su fabricación. En segundo lugar, la instalación de un mecanismo activo tiende a exceder en dificultad a la instalación de un control pasivo debido a la gran simplicidad que los controles pasivos suelen presentar frente a los controles activos. Si bien es cierto que muchas veces, debido a su mayor complejidad y capacidad de actuación, los controles activos dan mejores resultados que los controles pasivos, la relación rendimiento-coste es superada con creces en un gran número de ocasiones por mecanismos pasivos. Así mismo, los mecanismos de control pasivos tienden a caracterizarse por mayor robustez y adaptabilidad^[8]. Son estos y otros factores aquellos que han llevado a la selección de un mecanismo de control pasivo para el estudio llevado a cabo en la presente tesis.

En la última década ha tenido lugar una gran cantidad de estudios y ensayos de diferentes mecanismos pasivos de control sobre cuerpos romos. En ellos, el mecanismo de control cambia en función de la aplicación a la que presta servicio, pudiendo encontrarse desde modificaciones en la geometría de los objetos a los que se adhieren hasta elementos externos (unidos o no) que varían el comportamiento del flujo alrededor del mismo. En el caso de controles pasivos del flujo en cilindros de sección circular o semicircular, pueden encontrarse controles pasivos tales como la disposición de aletas por adhesión aguas abajo de un cilindro (Figura 5^[10]), el uso de material poroso en la superficie de un cilindro de sección semicircular (Figura 4^[4]) o la perforación de hileras de agujeros circulares a lo largo de la longitud de un cilindro hueco (Figura 6^[9]).

¹ Esta situación es la habitual, aunque no siempre es así pues los costes de los materiales utilizados en los mecanismos pasivos pueden alcanzar costes considerables y comparables a los costes de controles activos.

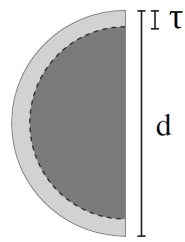


Figura 4. Mecanismo de capa porosa ^[4]



Figura 5. Mecanismo de aletas en parte trasera ^[10]

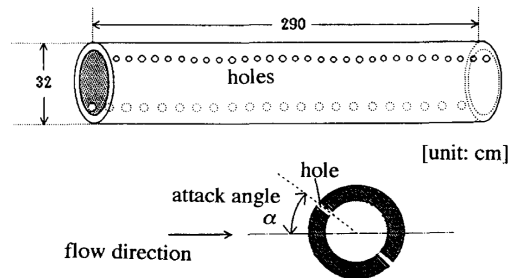


Figura 6. Mecanismo de perforación doble con inclinación ^[9]

Estos y otros muchos estudios realizados a día de hoy acerca de la reducción de la fuerza de arrastre a través del uso de mecanismos pasivos de control del flujo ^[4, 8, 9, 10, 11, 12, 55, 56, 58, 61] han permitido establecer el punto de partida de la presente investigación, en la que tres diferentes controles pasivos serán estudiados y su eficacia evaluada a partir de seis diferentes ensayos, tal y como se describe con detalle más adelante en capítulos posteriores. En ellos, se estudiarán los efectos en el drag derivados de la estela provocada por un cilindro de sección semicircular sumergido en un flujo de aire continuo, tomando como referencia el comportamiento del fluido cuando el cuerpo base está libre de mecanismos de control. A partir de ello, se podrán cuantificar la respuesta de cada uno de los mecanismos.

Capítulo 3

Ensayos

En este capítulo se aborda la parte de la investigación que constituye el grueso de la presente tesis. A lo largo del mismo se describirá con detalle cada uno de los ensayos realizados, sus características y peculiaridades, así como el objetivo por el cual han sido llevados a cabo. Con esta intención y de cara a una comprensión integral de los resultados posteriormente mostrados, se realizará una explicación de todo aquello que afecta significativamente a cada ensayo realizado. Para ello, se explicarán los materiales utilizados en la fabricación de cada uno de los mecanismos de control ensayados, las características de la zona en la que se efectuaron los ensayos y los instrumentos que han permitido la captura de los datos durante la ejecución de los ensayos.

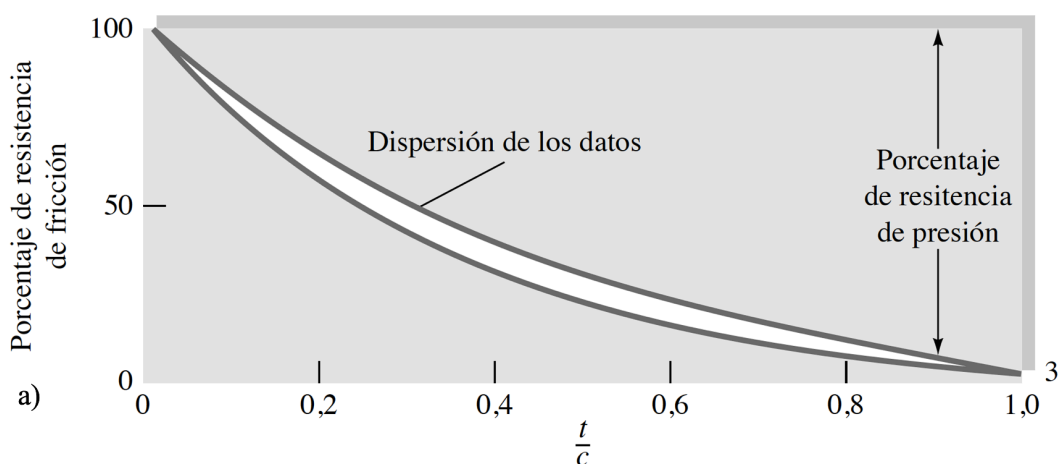
3.1 Mecanismos pasivos ensayados

En primer lugar, es ante todo necesaria una descripción de aquellos mecanismos pasivos que comprenden el objeto de ensayo de esta tesis pues de sus características derivan los diferentes resultados obtenidos tras la realización de los ensayos mencionados. A lo largo de esta sección se describirá con detalle cada uno de los mecanismos implantados y los efectos esperados de cada uno de ellos en el comportamiento del flujo alrededor del objeto. De igual manera, se expondrá el efecto que dicho comportamiento puede ofrecer sobre la reducción de la fuerza de arrastre que ejerce el cuerpo sumergido.

3.1.1 Mecanismo por aletas rígidas

El primer tipo de mecanismo ensayado en el desarrollo de este proyecto es aquél de aletas rígidas. Tal y como su nombre indica, se llevará a cabo la instalación de dos

aletas de alta rigidez a ambos lados de la parte trasera del cilindro base, tal y como indica la Figura 8. Tal y como se comentará en la próxima sección, estas aletas están formadas de un material con elevada rigidez de manera que se asegure la inhibición del movimiento de aleteo propiciado por el paso del fluido. Dado que no se conoce la longitud óptima que estas aletas han de poseer, se procederá al estudio de tres longitudes razonables. De esta manera, las aletas rígidas estudiadas pretenden simular los efectos de una continuidad del cuerpo base de forma que, tal y como se describe en White, Frank M., la relación entre el área frontal y la longitud del cuerpo en la dirección de la corriente aumente que provoque una reducción de la fuerza de drag. Además de las propiedades a efectos de drag que provoca la esbeltez del cuerpo ensayado gracias a la adición de las aletas rígidas, la resistencia del cuerpo relativa a la fricción aumenta considerablemente. Por ello, es necesario llegar a un equilibrio en el que ambas características (reducción de resistencia por esbeltez y aumento de la misma por incremento de la superficie en rozamiento) ofrezcan un punto de óptimo rendimiento. Una de las razones principales por las cuales se espera una reducción del drag en la introducción de este mecanismo pasivo es el retraso de desprendimiento de capa límite, a la vez que una reducción en la energía de los vórtices generados tras dicho desprendimiento. Así mismo, se espera un comportamiento parabólico de dicha reducción en la resistencia de la fuerza de arrastre dada la relación proporcional con la longitud de las aletas. Esta relación parabólica se ve claramente reflejada en la Figura 7 ^[33], donde la relación entre la sección frontal y la longitud del cuerpo sumergido queda enfrentada a su efecto sobre la resistencia de arrastre sufrida por el cuerpo.



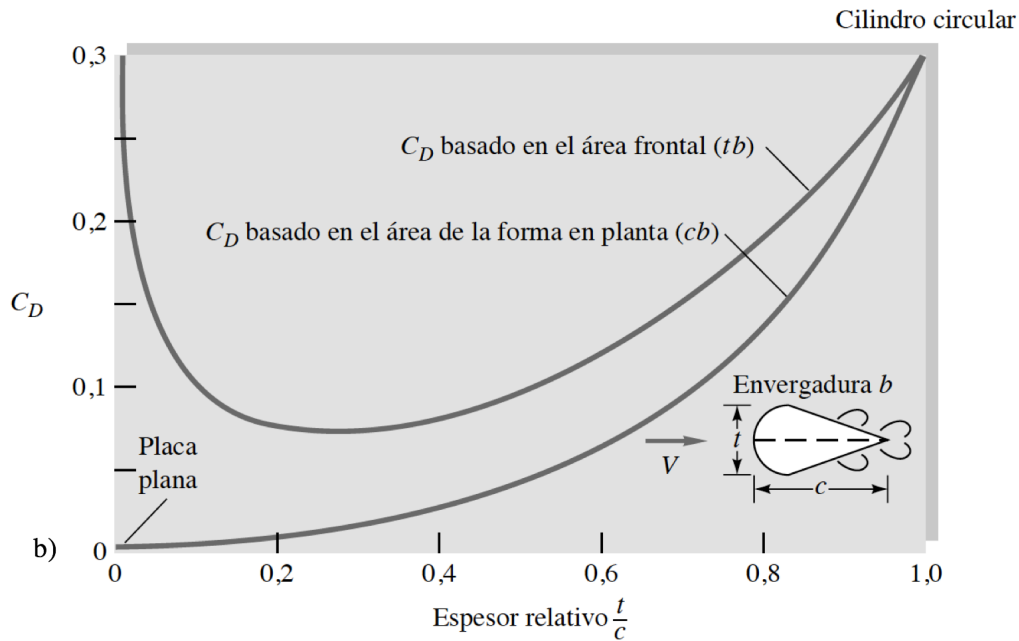


Figura 7. Efecto de la relación entre áreas frontal y transversal del cuerpo ensayado en a) el coeficiente aerodinámico y b) la distribución entre resistencia por fricción y por presión ^[33]

3.1.2 Mecanismo por aletas flexibles

Una vez caracterizado el efecto producido por la longitud de las aletas rígidas en el grupo de mecanismos pasivos anterior, se pretende mostrar la respuesta del flujo ante la variación de la rigidez del material. De esta manera, se busca estudiar el efecto del posible aleteo que pueda surgir con el uso de aletas flexibles sobre el flujo (Figura 8e) y Figura 8f) y, consecuentemente, sobre la resistencia de arrastre del objeto. Si bien es cierto que con las aletas rígidas se pretendía una reducción del drag dado el aumento en la esbeltez del cuerpo (y sus correspondientes consecuencias), el mecanismo por aletas flexibles trata de mejorar el mezclado del fluido en la parte trasera del mismo y, con ello, un aumento del nivel de turbulencia y de la velocidad del fluido. De esta manera se espera que estos aumentos deriven en una reducción de la fuerza de arrastre dado el aumento de velocidad del aire en dicha zona. Si bien es cierto que la flexibilidad jugará un papel importante, es posible que la rugosidad del material utilizado también lo haga. Tal y como se comenta en secciones posteriores del presente documento, los materiales utilizados para la fabricación difieren no sólo en el grado de rigidez de los mismos sino también en otras propiedades que pueden influir en el resultado final (como pueden ser la densidad del material, su rugosidad, etc.).

Por lo tanto, de manera equiparable a como se realizó en el caso de los mecanismos por aletas rígidas, se llevarán a cabo dos ensayos con diferentes longitudes de aleta. De esta manera, se podrá advertir el efecto conjunto de la flexibilidad y la longitud de las aletas en el comportamiento del flujo y su influencia en el valor de la fuerza de arrastre global del objeto.

3.1.3 Mecanismo por ranura longitudinal

Por último, el mecanismo pasivo seleccionado para mejorar el comportamiento del flujo alrededor del cuerpo base y, en concreto, para reducir el valor de su resistencia de arrastre, es la perforación de una ranura a lo largo de toda la longitud del cilindro semicircular base (Figura 8g)). De manera contraria a como ocurre en los casos anteriores, este mecanismo pretende aumentar el mezclado de aire turbulento en la zona inmediatamente trasera del cilindro base gracias al paso de aire por la ranura creada. Este mecanismo presenta una solución innovadora al problema pues se espera un aumento en los valores de velocidad en dirección paralela al movimiento de la corriente y, con ello, una reducción en el nivel de turbulencia aguas abajo del objeto.

Si bien es cierto que es posible que los beneficios del aumento de esbeltez que pueden darse en los mecanismos anteriores se hayan perdido con el mecanismo pasivo presentado, los futuros costes asociados a él pueden verse considerablemente reducidos dada la poca necesidad de trabajo necesario para crearlo. Esto puede que equilibre la falta de reducción de drag del mecanismo frente al resto. Sin embargo, este es un asunto que se explicará más extensamente en secciones posteriores de este mismo documento.

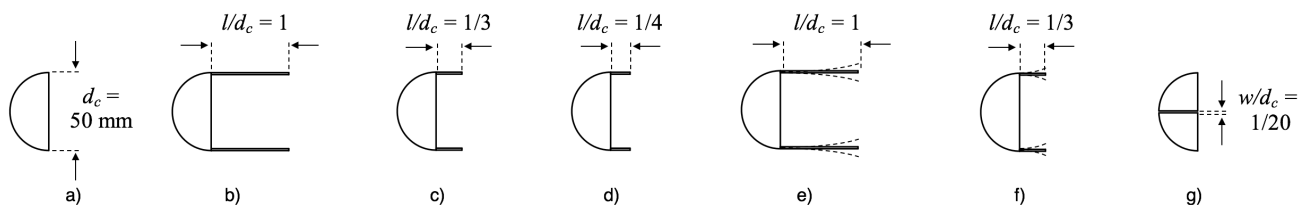


Figura 8. Mecanismos pasivos ensayados a) Cuerpo base; b) Aletas rígidas de $l/d_c = 1$; c) Aletas rígidas de $l/d_c = 1/3$; d) Aletas rígidas de $l/d_c = 1/4$; e) Aletas flexibles de $l/d_c = 1$; f) Aletas flexibles de $l/d_c = 1/3$ y g) Ranura longitudinal

3.2 Selección de los materiales

Tal y como se ha explicado anteriormente, los diferentes mecanismos pasivos de control ensayados y estudiados en la presente investigación demandan una serie de materiales que cumplan con determinadas propiedades de manera que los resultados obtenidos sean veraces y útiles a la vez que extrapolables de cara a la aplicación a la que este estudio pretende prestar servicio. Con este objetivo, todos y cada uno de los materiales utilizados requieren de un previo estudio del campo al que pertenecen. De esta manera, han de mostrar una serie de características y propiedades respalden su utilización en esta investigación en vez de otros. A la vez que se realizó el estudio de los distintos materiales, también se incorporó un estudio económico y de costes. Así, la elección final mantuviese un equilibrio entre las prestaciones dadas por el material seleccionado sin, por ello, perder viabilidad en el aspecto económico. Esto aumenta considerablemente la utilidad de los mecanismos estudiados pues permite extrapolar los resultados obtenidos sin necesidad de aplicar cambios futuros de los materiales utilizados para la creación de los mecanismos como consecuencia de sus elevados costes.

Finalmente, todo esto deriva en la utilización de diferentes materiales en función de las diferentes partes del objeto a ensayar y, por lo tanto, de su función en el ensayo. Es por ello que se pueden identificar dos principales partes en los ensayos en cuanto a materiales se refiere: cuerpo y mecanismos pasivos.

3.2.1 Cuerpo

El cuerpo de los ensayos realizados es, tal y como se ha explicado en diversas ocasiones, un cilindro macizo de sección semicircular sobre el que se implantan los diversos mecanismos pasivos de control del flujo. El cuerpo, al suponer una de las partes fundamentales de este estudio, merece un estudio crítico de los posibles materiales posibles. Una de las grandes ventajas que este estudio puede arrojar es la posibilidad, posteriormente, poder extrapolar los resultados obtenidos de los ensayos a una escala más realista sin necesidad de realizar ajustes significativos. Es decir, el objetivo de estudiar los materiales a utilizar es la obtención de resultados más fiables a la realidad. Con ello, el material ha de compartir las propiedades que poseen los

materiales utilizados actualmente en la fabricación de espejos laterales en lo que a comportamiento aerodinámico se refiere. De esta manera, es fundamental conocer los materiales normalmente utilizados para la fabricación de estos componentes.

En la actualidad, la gran mayoría de vehículos actuales poseen una carrocería exterior fabricada básicamente a partir de aluminio ^[19, 20] o plástico ^[63, 64]. De igual manera, la superficie frontal de los espejos laterales suele contener uno o ambos materiales. Si bien es cierto que el aluminio es utilizado en mayor proporción, el plástico ha incrementado notablemente su presencia en los últimos años hasta alcanzar límites del 18% en 2020 (Figura 9 ^[39]).

Por otro lado, los aluminios utilizados en la industria del automóvil para la parte externa del vehículo cambian en función del fabricante, el modelo y las características que dicho fabricante desea aportar (seguridad, ligereza, etc.). Sin embargo, uno de las aleaciones de aluminio más comunes en esta industria es el Aluminio 6111 (UNS A96111) debido, sobre todo, a la reducción en peso que conlleva y su fácil mecanizado, entre otros.

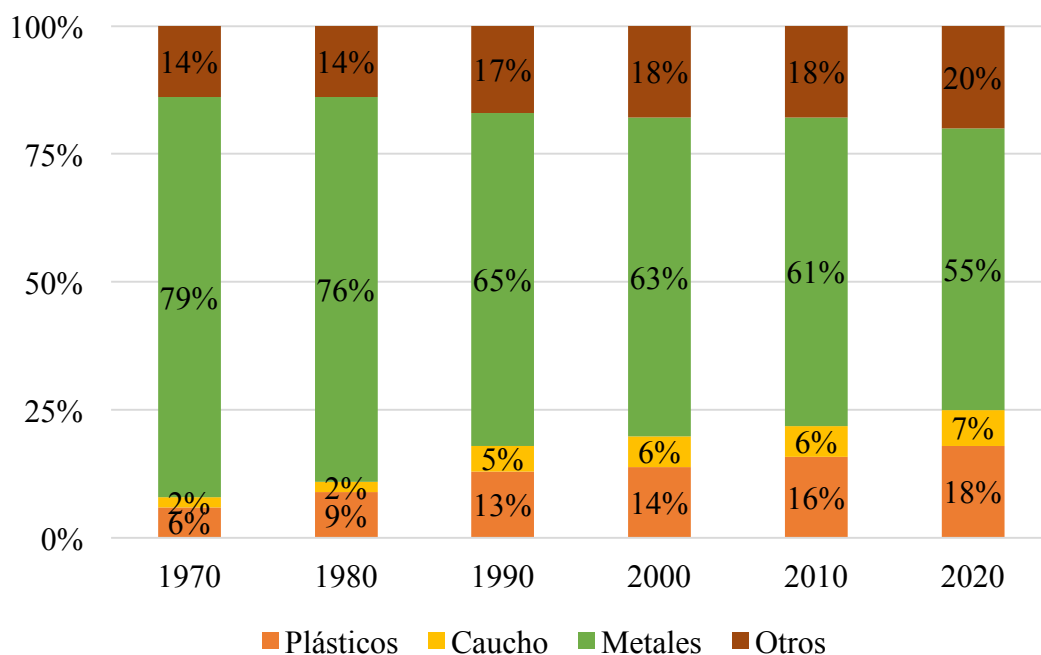


Figura 9. Contribución de los principales materiales en un vehículo ^[39]

Tras un estudio de mercado acerca de las diferentes propiedades del Aluminio 6111, sus costes y su accesibilidad, se llevó a cabo una búsqueda de aquellos plásticos

que mejor equiparaban las propiedades físicas de este. Ya que el comportamiento del cuerpo base ha de asemejarse lo máximo posible al comportamiento que tendría el cuerpo de un espejo lateral cuando el flujo lo rodea, se requiere que presente una rigidez alta. Por otro lado, debido a la esbeltez del cuerpo base utilizada en los ensayos (45 cm de longitud y 5 cm de sección perpendicular a la dirección del viento), se había de vigilar que el cuerpo no flexionase ante la acción del viento. De entre todos los plásticos existentes, se evaluaron aquellos de uso más general y, de entre sus propiedades, se dio mayor importancia al valor de los Módulos de Young y Módulos de Rigidez (Figura 10 ^[21] y Figura 11 ^[21], respectivamente). Finalmente, una vez comprobada la accesibilidad de los mismos en las dimensiones y geometrías requerida para llevar a cabo los ensayos, se evaluó exhaustivamente su coste de adquisición. Tras establecer las prioridades de cada una de las características requeridas, se concluyó que el plástico acrílico era aquel que mejor se adaptaba a lo exigido en base a las propiedades mecánicas comparadas. A continuación, se muestran las tablas que resumen los datos comentados acerca de los diferentes valores que cada tipo de plástico considerado posee.

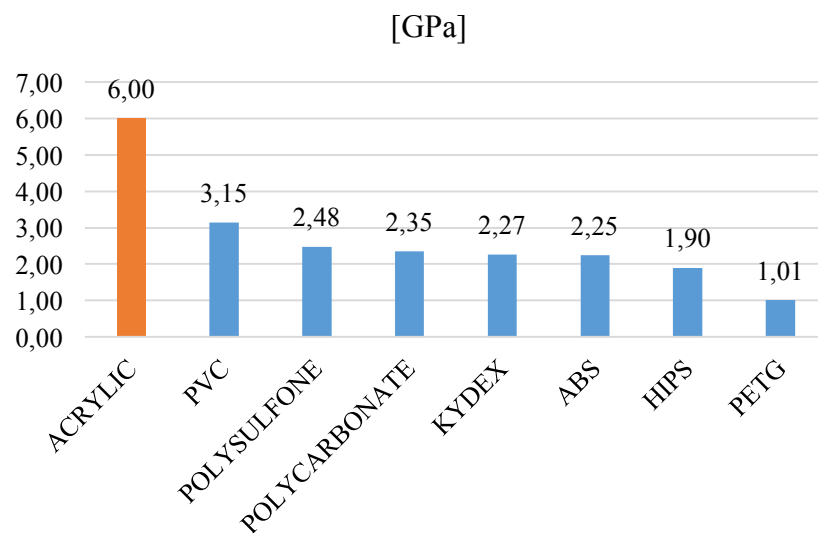


Figura 10. Módulo de Young por tipo de plástico ^[21]

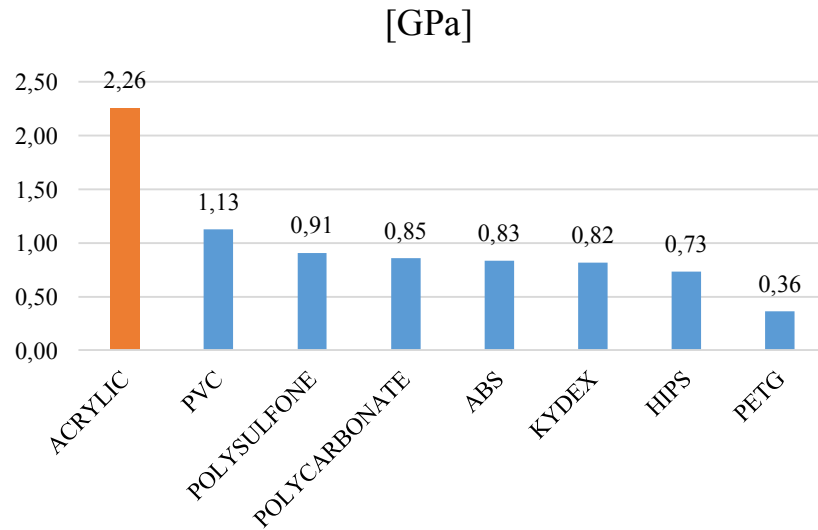


Figura 11. Módulo de Rigidez por plástico ^[21]

Tras observar las propiedades físicas y comprobar que el plástico acrílico es de los que mejor comportamiento ofrece, se evaluó el coste de cada uno de los plásticos de manera relativa, esto es, el porcentaje de unos respecto de otros (Figura 12). Esto proporciona el plástico más asequible en términos comparables (misma cantidad, geometría, tamaño del pedido, etc.).

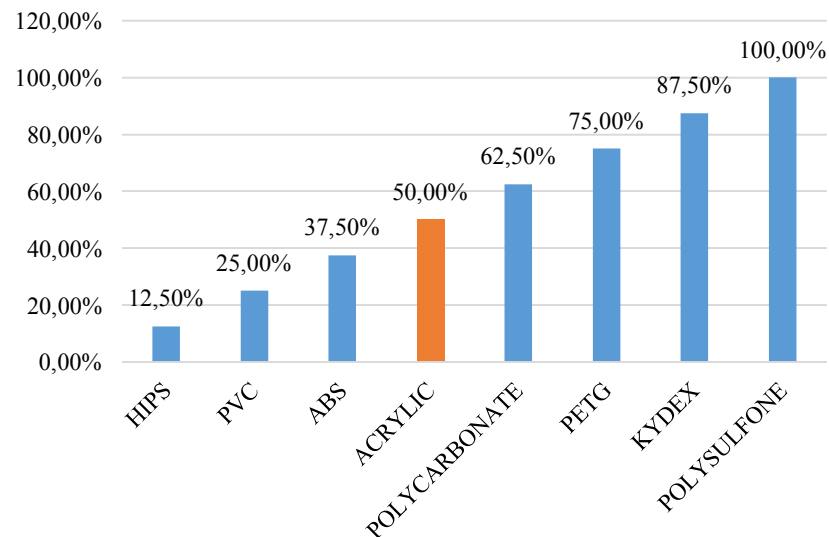


Figura 12. Relación porcentual de costes

Tal y como se puede observar en la Figura 12, el coste de adquisición del plástico acrílico es, en general, la mitad del coste observado en plástico más caro del grupo

evaluado. Debido a que este nivel de coste, junto con la posición que ocupa el plástico acrílico en cuanto al resto de propiedades, no deja clara la selección del plástico que proporcionaría mejores condiciones y comportamiento a la hora de realizar los ensayos en relación al precio que muestra. Con el interés de despejar dudas, se llevó a cabo una matriz de decisión que ayudó a escoger uno u otro en función de los datos manejados (Tabla 1). Esta matriz de decisión utilizó una ponderación mayor para indicar una mayor importancia de la característica en cuestión. De esta manera, se proporcionaron valores 1, 2 o 3, según la menor o mayor repercusión de cada propiedad, respectivamente. Finalmente, el plástico escogido es aquel que mayor puntuación obtuviese. Dado que se trata de un primer estudio que pretende conformar la partida del área de investigación en cuestión, el coste de los materiales supone el principal factor a tener en cuenta. Entre otras razones, al no existir precedentes claros, la selección de los materiales en función de los parámetros comentados no implica unos resultados completamente previsibles, sino que aún existe cierta incertidumbre sobre su comportamiento en los ensayos. Asimismo, los materiales no suponen el tema de estudio de esta investigación, con lo que no se pretende descubrir el material que mejores prestaciones proporciona.

Debido a que el coste es una propiedad “negativa”, es decir, cuyo valor afecta negativamente al material al que refiere, se efectuó en el resultado de la matriz de decisión se restó, apoyando así que el plástico con valor más elevado, sea aquel que mejores prestaciones posea. A continuación se muestra también una gráfica en la que están representados gráficamente los resultados de la matriz de decisión (Figura 13).

Tabla 1. Matriz de decisión para plásticos

Material	(1)		(2)		(3)		Resultado (1) + (2) - (3)
	Módulo de Young (GPa) Ponderación = 1		Módulo de Rigidez (GPa) Ponderación = 3		Relación de Costes (%) Ponderación = 2		
	Sin ponderar	Ponderado	Sin ponderar	Ponderado	Sin ponderar	Ponderado	
HIPS	1.90	1.90	0.73	2.19	12.50%	0.25	3.84
PVC	3.15	3.15	1.13	3.38	25.00%	0.50	6.03
ABS	2.25	2.25	0.83	2.50	37.50%	0.75	4.00
ACRYLIC	6.00	6.00	2.26	6.77	50.00%	1.00	11.77
POLYCARBONATE	2.35	2.35	0.85	2.56	62.50%	1.25	3.66
PETG	1.01	1.01	0.36	1.08	75.00%	1.50	0.59
KYDEX	2.27	2.27	0.82	2.45	87.50%	1.75	2.97
POLYSULFONE	2.48	2.48	0.91	2.72	100.00%	2.00	3.20

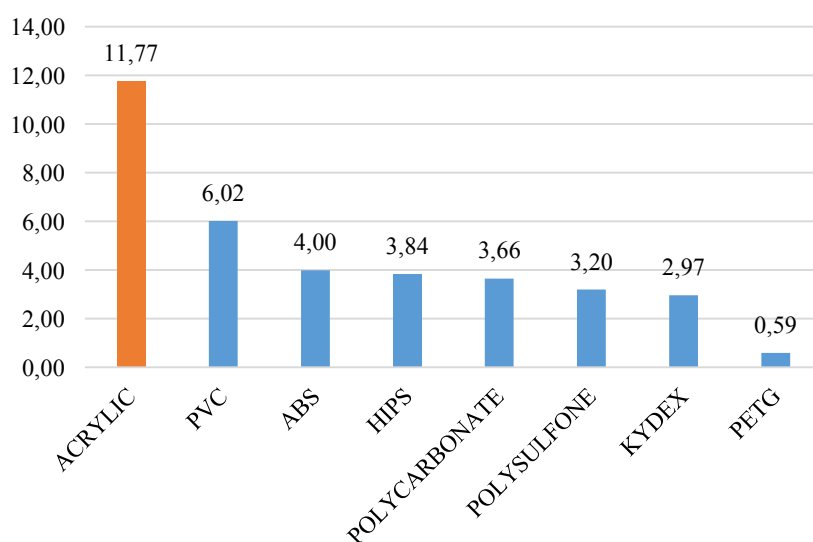


Figura 13. Resultados de la matriz de decisión para plásticos

Tal y como se puede observar en la matriz de decisión generada para la selección del plástico a utilizar, el plástico acrílico es aquel que mejores características reúne para ser el material plástico del que se fabrique el cuerpo base. Una vez observadas las propiedades y el coste del plástico acrílico, este destaca principalmente por su rigidez, resistencia a las condiciones climatológicas y su baja densidad en relación a su coste de adquisición.

Una vez seleccionado el tipo de plástico que mejor hace frente al aluminio utilizado en la industria del automóvil de manera más común, se hace necesario comparar ambos materiales para, de esta manera, determinar cuál de los dos encaja de mejor manera en el presente estudio como material del cuerpo base. Para ello, se evaluó la densidad,

el módulo de Young y el coste de adquisición de ambos materiales en la geometría deseada. Tal y como muestra la Tabla 3, la densidad del plástico llega a ser prácticamente la mitad que la del aluminio (según los datos, es un 43.04% de la densidad del aluminio 6111), mientras que el módulo de Young es significativamente menor en el caso del plástico acrílico. Consecuentemente, el Módulo de Rigidez (bajo el nombre de Módulo de Cizalladura). En relación al coste de ambos materiales, se ha evaluado la dificultad de adquirir ambos materiales en las proporciones y dimensiones requeridas, resultando considerablemente más sencillo de encontrar el plástico acrílico que el aluminio 6111. Sin embargo, con la intención de dar una idea aproximada, se evaluaron diferentes proveedores de plástico acrílico junto con diferentes aleaciones de aluminio con propiedades similares y, por lo tanto, con un coste presumiblemente similar (Tabla 2 ^[67, 68, 69] y Tabla 3). De esta manera, se expresa una idea similar al coste que supondría la adquisición del aluminio 6111.

Tabla 2. Comparación de características y propiedades entre el aluminio y el plástico

Material	Tipo/Aleación	Densidad (g/cm ³)	Densidad media	Módulo de Young, E (Gpa)	Módulo de Young medio	Coficiente de Poisson	Módulo de Cizalladura	Precio	Precio medio
Plástico	Acrílico	1.182	1.182	6.000	6.000	0.330	2.256	\$ 23.09	\$ 26.85
Plástico	Acrílico	1.182		6.000					
Aluminio	6061-T6	2.700	2.747	68.900	69.167	0.330	26.003	\$ 18.59	\$ 28.72
Aluminio	6262-T6511	2.710		68.300					
Aluminio	2011-T3	2.830		70.300					

Tabla 3. Comparación de características del aluminio y del plástico

Diferencia de densidad	43.04%
Diferencia de Módulo de Young	8.71%
Diferencia de Módulo de Rigidez	8.67%
Diferencia de precio	6.52%

Tal y como se puede observar, el coste del plástico acrílico es, de media, un 6.52% más barato que el coste del homólogo en aluminio. Con estos resultados se escogió el plástico acrílico como material del cuerpo base. Las razones de ello son, principalmente, el coste de adquisición en las cantidades y geometría deseadas, a la vez que la accesibilidad al mismo.

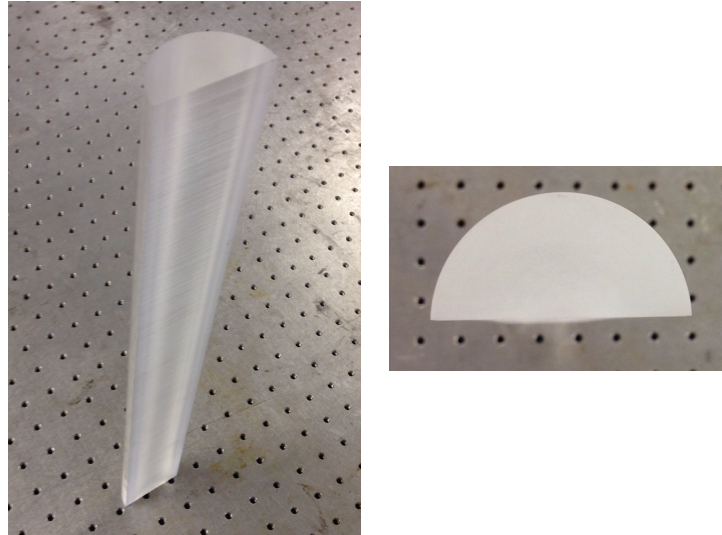


Figura 14. Cuerpo base en plástico acrílico

3.2.2 Mecanismos pasivos

En cuanto al material utilizado para la fabricación de los mecanismos pasivos de control del flujo posteriormente implementados, se ha de tener en cuenta la función de cada mecanismo. De esta manera, aparecen tres principales tipos de mecanismos según su funcionalidad: aletas rígidas, aletas flexibles y ranura longitudinal.

En primer lugar, el mecanismo pasivo basado en la realización de una ranura longitudinal queda descartado para el análisis del material utilizado en el pues, tal y como trivialmente se comprueba, no hay aporte de material implicado en dicho mecanismo. En cuanto a los mecanismos pasivos por aletas, ambos necesitan un material que se ajuste al servicio que pretenden dar.

Tal y como su nombre dice, el mecanismo pasivo de control por aletas rígidas requiere que el material utilizado posea unas características que eviten su flexión como resultado del momento que sobre el ejercerá el flujo de viento que rodea al cuerpo, es decir, que sean rígidas. De cara a la búsqueda de materiales que en un futuro pudiesen integrarse en los retrovisores laterales de un vehículo real, el aluminio y el plástico vuelven a liderar las posibles opciones. De cara a obtener un mayor provecho del estudio realizado para la determinación del material utilizado en el cuerpo base, se propuso el uso de plástico acrílico para la fabricación de las aletas rígidas. Esto se debe al alto valor del Módulo de Rigidez que este tipo de plástico presenta frente al resto de plásticos observados (al menos un 105.50% superior del siguiente en la lista, tal y

como muestra la Figura 11). Ello, unido a la poca longitud de las aletas en la dirección de movimiento del viento (que es la dirección en la cual, a mayor longitud de aleta y misma fuerza de aplicación, mayor momento sobre el eje que une aleta y cuerpo base y, por lo tanto, mayor posibilidad de provocar un movimiento de “aleteo”), supone una gran rigidez en el comportamiento de la aleta durante los ensayos. Por todo ello, el material seleccionado para la fabricación del mecanismo pasivo por aletas rígidas es el plástico acrílico.

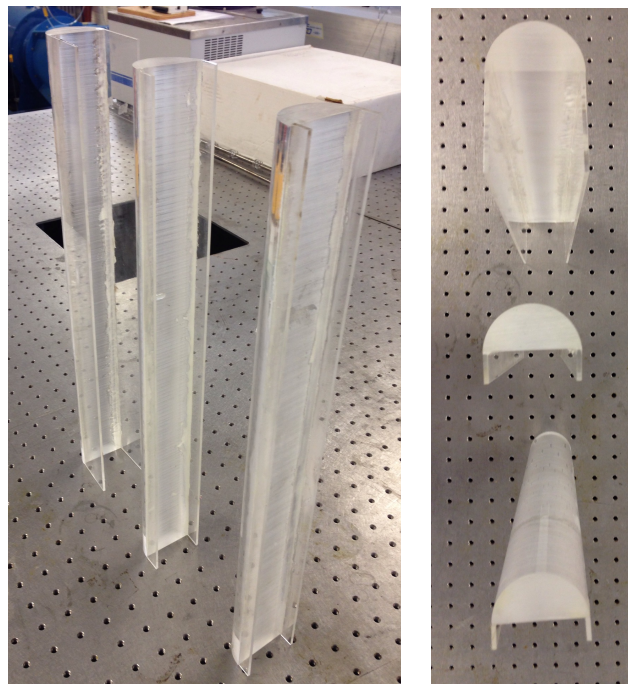


Figura 15. Aletas rígidas de plástico acrílico

Por otro lado, las aletas flexibles requieren una flexibilidad alta para precisamente favorecer el aleteo mencionado. Dicha flexibilidad se puede medir también a través del Módulo de Rigidez del material. De manera opuesta a la rigidez, la flexibilidad de un material se acentúa cuanto mayor es el valor de dicho Módulo de Rigidez.

Debido a las características dimensionales de las aletas utilizadas y su reducida longitud en la dirección del movimiento del viento, el movimiento de aleteo buscado no es posible con el uso de los plásticos estudiados anteriormente. Si bien es cierto que ajustando el grosor de las aletas se pueden alcanzar buenos niveles de flexibilidad en ciertos plásticos como el PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified) o el KYDEX, sin embargo, su coste de adquisición se eleva considerablemente. Como alternativa, se procedió al análisis de diferentes materiales característicos por su

flexibilidad, como pueden ser los elastómeros. De entre los innumerables elastómeros existentes se seleccionaron los cauchos elastómeros como grupo de análisis gracias a su gran accesibilidad y reducido valor adquisitivo. De igual manera que con el cuerpo base, se evaluaron diferentes propiedades de dichos materiales a través de un sistema de puntuación que indica el comportamiento (bueno o malo) de dicho material en el aspecto específico en cuestión (Tabla 4). De entre todas las puntuaciones dadas, aquel material que mejores condiciones presenta es el Caucho Natural, seguido del Fluorocarbono – FKM (puntuaciones de 7,42 y 7,17 sobre 10, respectivamente). De esta manera, se evaluó también el comportamiento del Caucho Natural frente al comportamiento medio del resto de cauchos considerados, tal y como se muestra en la Figura 16.

Tabla 4. Propiedades de los cauchos considerados

Propiedad Básica	Muy Bueno = 1		Pobre = 0,25										
	Media	NBR	HNBR	EPDM	FKM	CR	AC M	AEM	SBR	AU/EU	VMQ	FVMQ	NR
Economy of Material	0.51	1.00	0.25	0.50	0.33	0.50	0.33	0.25	1.00	0.33	0.33	0.25	1.00
Compression Set Resistance	0.67	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.25	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	1.00
Resilience (rebound)	0.53	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00
Tear Strength	0.52	0.50	1.00	0.50	0.50	0.50	0.33	0.50	0.33	0.50	0.25	0.33	1.00
Heat Aging Resistance	0.69	0.33	0.50	0.50	1.00	0.33	1.00	1.00	0.33	1.00	1.00	1.00	0.33
Ozone Resistance	0.65	0.25	0.50	0.50	1.00	0.50	0.50	1.00	0.25	1.00	1.00	1.00	0.25
Resistencia a Oil & Grease	0.53	0.50	0.50	0.25	1.00	0.50	1.00	0.33	0.25	0.50	0.33	1.00	0.25
Fuel Resistance	0.37	0.25	0.33	0.25	0.50	0.25	1.00	0.25	0.25	0.33	0.25	0.50	0.25
Water Swell Resistance	0.65	0.50	0.50	1.00	0.50	0.33	0.25	0.50	1.00	0.25	1.00	1.00	1.00
Gas Impermeability	0.40	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	0.33	0.50	0.33	0.50	0.25	0.25	0.33
Dynamic Service Abrasion Res.	0.57	0.50	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	0.25	0.25	1.00
Puntuación total	6.10	5.83	6.08	5.83	7.17	4.92	5.83	5.83	5.75	6.25	5.67	6.58	7.42

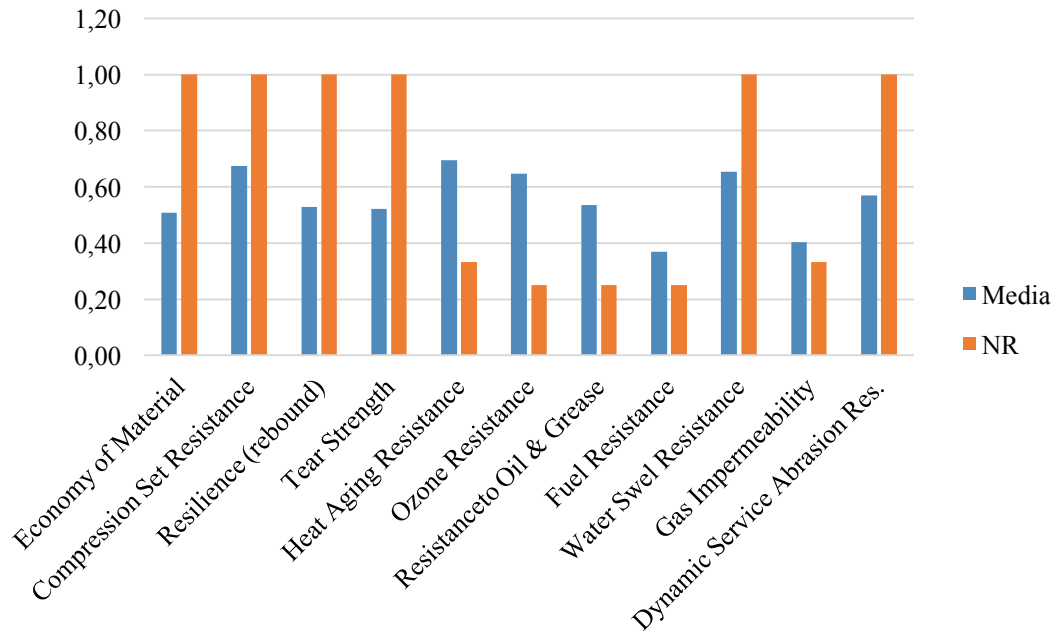


Figura 16. Comparación del Caucho Natural (NR) con la media

Tal y como puede observarse, el Caucho Natural ofrece la mejor puntuación posible en 6 de las 11 características evaluadas. Sin embargo, dado que no todas las características mostradas poseen un significado importante de cara a la función que van a prestar, se llevó a cabo una ponderación de aquellos aspectos que más interesaban en esta práctica. Concretamente, se proporcionó importancia máxima a la economía del material, es decir, a su coste, seguido de la resiliencia del mismo. Como consecuencia de dicha ponderación, se obtuvieron los siguientes resultados.

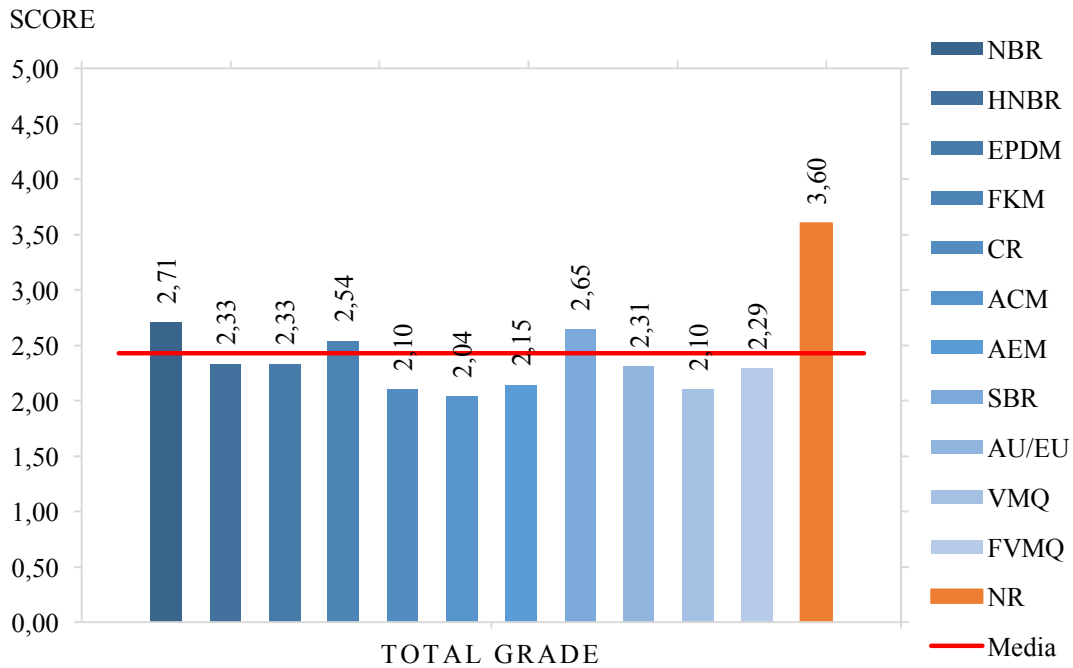


Figura 17. Puntuación ponderada conjunta de cada material

En el gráfico mostrado se observa claramente cómo el Caucho Natural (NR) predomina la puntuación conjunta si esta pondera con mayor peso aquellas características que proporcionan mayor eficacia en el comportamiento como mecanismo pasivo de control. Tras este análisis, el material a utilizar para la fabricación de las aletas flexibles fue el Caucho Natural pues, además de observar que proporciona mejores prestaciones que el resto de cauchos y plásticos, su accesibilidad es significativamente mayor debido a la multitud de aplicaciones y su volumen de utilización en la industria actual.

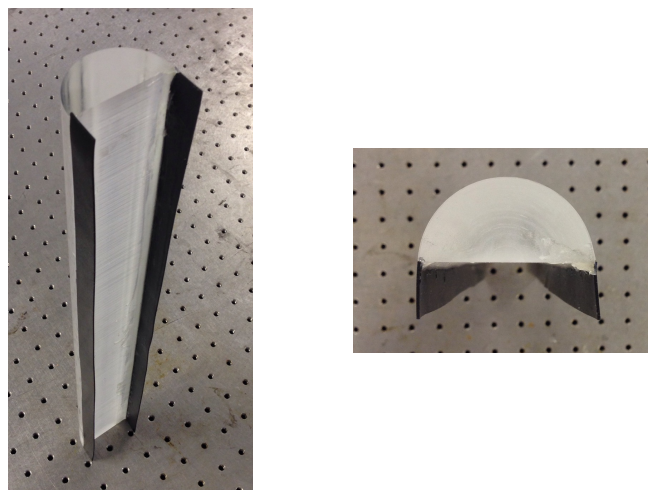


Figura 18. Aletas flexibles de Caucho

3.3 Características de la zona de ensayo

3.3.1 Túnel de viento

Todos los ensayos comentados en apartados previos se llevaron a cabo en un túnel tipo Eiffel. Este tipo de túnel recibe su nombre debido a la característica tramo de entrada al mismo, el cual observa una reducción de sección bidimensional o tridimensional parabólica, asemejándose a la parte inferior de la conocida Torre Eiffel. En este caso, el túnel de viento utilizado es aquel presente en el Laboratorio Talbot de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Este es un túnel de viento de corriente aspirada y, por lo tanto, contiene los ventiladores de aspiración situados al final del túnel, en vez de situarlos al principio. En cuanto a la cámara de ensayos, es de tipo cerrado ya que posee paredes laterales que mantienen la separación con el resto de la sala. Esta cámara de ensayos se caracteriza por poseer unas dimensiones de entrada de 0,457 metros de alto y 0,914 metros de ancho, a la vez que una longitud total de 6,100 metros. Finalmente, el túnel conforma un circuito fluido abierto en el que el aire es aspirado del local en el que está situado y descargado a la misma. Asimismo, está conformado por cuatro zonas bien diferenciadas que, según el sentido del flujo, pueden citarse como: zona de contracción de la entrada, zona o cámara de ensayos y zona del difusor que abre la abertura para la cabida de los ventiladores, situados consecutivamente en la sección de ventiladores, tras la cual se encuentra la salida del túnel (Figura 19). Por otro lado, se ha de tener en cuenta que el túnel posee un techo ajustable que puede ser calibrado para habilitar el crecimiento de capa límite hasta la obtención de un gradiente de presiones nulo. Asimismo, la ratio entre los grosores de capa límite en cada una de las paredes fue diseñado para resultar menor a 0,09.

Tal y como se habrá podido notar, la longitud de los cuerpos ensayados (0,450m) y la altura de la cámara de ensayos (0,457m) difieren en 0,07m. Esta intencionada diferencia se calculó para evitar problemas a la hora de introducir e instalar cada uno de los objetos en la posición adecuada, así como la búsqueda de una mayor agilidad en el proceso de sustitución de un cuerpo por otro puesto que una vez se ha fijado la altura del techo de la cámara de ensayos. Además, la altura del techo ha de mantenerse

constante entre ensayos para que los resultados arrojados conserven consistencia y permitan una comparación fiable. Finalmente, para poder ajustar cada uno de los cuerpos se dispondrá de sendas láminas de 0,035m de grosor en cada uno de los extremos del cuerpo.

En consecuencia a lo comentado, se ha de calcular el valor del coeficiente de bloqueo durante los ensayos ya que, en caso de superar el 6%, sería necesario llevar a cabo un reajuste en la velocidad de entrada del flujo.

El coeficiente de bloqueo se define como:

$$B_g = A_{CL} / A_S \quad (1)$$

Donde A_{CL} es el área bloqueada por la corriente de aire entrante y A_S es el área de la sección en la que se encuentra el objeto que bloquea el paso al flujo. De esta manera:

$$\left. \begin{aligned} A_{CL} &= A_{Cuerp} + 2 \times A_{Lam} = 0.023 \text{ m}^2 \\ A_S &= 0.418 \text{ m}^2 \end{aligned} \right\} B_g = 5.49\% \leq 6\%$$

se puede advertir que $B_g = A_{CL} / A_S = 0,05 / 0,914 = 5,47\% \leq 6\%$, por lo que no es necesario reajustar la velocidad del flujo libre de entrada. Puede encontrarse más información acerca de este túnel en Adrian, R. J., *et al.*

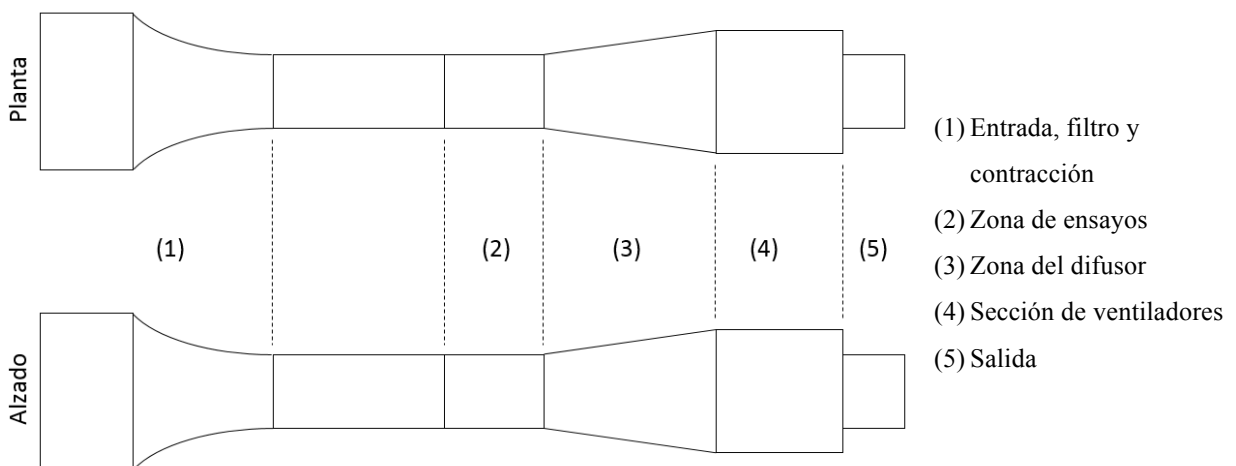


Figura 19. Planta y alzado del túnel de viento Eiffel, dimensiones y zonas características

3.3.2 Caracterización del flujo de entrada

Con el objetivo de reproducir unas condiciones de trabajo lo más similares posible a las condiciones reales en las que los mecanismos de control actuarían tras colocarse en los espejos laterales de un vehículo, se fijaron unos parámetros de velocidad y temperatura del aire de entrada. Para ello, se llevó a cabo el cálculo del número de Reynolds del fluido que circula alrededor de un espejo lateral en condiciones normales. De esta manera, se evaluaron las dimensiones de los espejos laterales de una flota de 24 vehículos comerciales^[44]. De estas dimensiones se obtuvo un valor aproximado del perímetro y superficie de la sección de los mismos para, finalmente, poder determinar el diámetro hidráulico medio ($d_h = 4A/P$). Con ello, se procedió a calcular el Número de Reynolds de un flujo alrededor de dicho cuerpo si este viajase a una velocidad de 20 km/h a temperatura de 20°C. El resultado arroja un valor de $Re_d = U_\infty d_h / \nu = 6,743 \times 10^4$, donde U_∞ representa la velocidad del flujo libre, d_h es el diámetro hidráulico del objeto y ν es la viscosidad cinemática del fluido, en este caso, del aire. Fijado este valor, se calculó la velocidad del aire en la zona de ensayo del túnel para alcanzar valores de Reynolds similares. En función de las dimensiones del objeto a ensayar y las limitaciones físicas del túnel de viento utilizado, se seleccionó una velocidad de $U_o = 9,5 \text{ ms}^{-1}$. Esta velocidad implica un valor de Reynolds del flujo alrededor de los diferentes objetos ensayados de $Re_{0,05} = 3,045 \times 10^4$, lo cual se asemeja considerablemente al orden de magnitud fijado.

Tabla 5. Comparación de valores de Reynolds

	Viscosidad cinemática, ν (m²/s)	Velocidad del Flujo Libre, U_∞ (m/s)	Diámetro hidráulico, d_h (m)	Número de Reynolds, Re
Ensayo	1.56E-05	9.50	0.050	3.045E+04
Caso real	1.56E-05	5.556	0.189	6.743E+04

Con estos resultados, se puede comprobar como el régimen del flujo sobre la capa límite de aire que rodea al objeto durante los diferentes ensayos es laminar ($Re \leq 5 \times 10^5$, aproximadamente).

3.4 Instrumentación utilizada

De cara a la obtención de los datos pertinentes de cada ensayo, es necesario describir los instrumentos utilizados para llevar a cabo las mediciones ya que, en función del mecanismo y la tecnología de medición utilizada, se obtendrán unas u otras variables. Dadas estas variables, se llevaron a cabo diferentes operaciones para finalmente obtener los valores de aquellas otras que aportan la información pretendida a la presente investigación.

Tal y como se ha comentado bastamente en el apartado anterior, el instrumento principal utilizado para proceder a la realización es el túnel de viento tipo Eiffel del Laboratorio Talbot de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Por otro lado, se han de considerar aquellos elementos que permiten la medición de los diferentes parámetros que caracterizan el flujo alrededor de los diferentes objetos ensayados. El principal instrumento utilizado es un velocímetro por imágenes de partícula (o por sus siglas en inglés, PIV - Particle Image Velocimetry) para la visualización del flujo. Este es un método basado en la óptica para la obtención y representación del campo de velocidades que gobierna al fluido medido, así como otras propiedades relacionadas del mismo, dando así una cuantitativa a un concepto principalmente cualitativo durante la última década como es la representación gráfica de flujos ^[45]. Con este objetivo, el método PIV basa su modus operandi en la captación y seguimiento de trazas de una sustancia determinada (en este caso, aceite de oliva equitativamente distribuidas aguas arriba del túnel de viento) de tal manera que, por su reducido tamaño, son capaces de representar fielmente al fluido en el que se encuentran sumergidas. Por otro lado, si bien es cierto que el tamaño de las partículas utilizadas en los ensayos llevados a cabo es de 1µm, este tamaño determina el grado de fiabilidad con el que las partículas sumergidas representan el movimiento y comportamiento del fluido en cuestión. Para ello, el mencionado nivel o grado de fidelidad viene dado por el conocido Número de Stokes (Stk), donde un valor bajo de este número indica una gran fiabilidad mientras que un valor alto implica que el comportamiento de las partículas esta principalmente gobernado por su inercia y continua con su trayectoria inicial. Existen otras técnicas o métodos para llevar a cabo la caracterización de un flujo alrededor de un cuerpo como pueden ser el anemómetro de filamento o hilo caliente o el anemómetro láser Doppler.

Si bien el primero se explicara con mayor detenimiento a continuación, la principal diferencia entre estos métodos y el PIV es la capacidad que este tiene de representar el campo de velocidades en campos vectoriales de dos o tres dimensiones (en concreto, en esta investigación se escogió el estudio en 2D, tal y como se justifica en capítulos anteriores), mientras que los otros métodos miden la velocidad en un punto determinado. Por último, es necesario mencionar el efecto de la concentración en el resultado del PIV. Si se trata de una muestra muy densa, cada una de las imágenes obtenidas permite la identificación de todas y cada una de las partículas captadas. Sin embargo, no es posible realizar un seguimiento de cada una de las partículas por separado entre las diferentes imágenes. Si, por el contrario, la concentración de trazas es suficientemente pequeña para poder realizar el seguimiento, el método deja de ser PIV sino PTV (Particle Tracking Velocimetry).

Para una correcta implantación y utilización del método PIV, se requiere del uso de otros instrumentos para la captación del campo de velocidades. En primer lugar, es necesario una cámara que capta las partículas de aceite de oliva lanzadas aguas arriba, en este caso se utilizará una cámara de tipo “11 MP (4000 x 2672 pixel) 12-bit frame-straddle CCD”. Asimismo, el láser utilizado para iluminar el campo de visión (FOV, por sus siglas en inglés) de la cámara es un láser de tipo Quantel de doble pulso y 250mJ por pulso.

Por último, se utilizará software PIV para parte del post-procesado de los datos. Este software utiliza los datos almacenados durante los ensayos para generar matrices en las que se representa el valor de los diferentes parámetros deseados en cada punto del campo de visión utilizado durante el ensayo. Finalmente, se procede al uso de Matlab para la representación gráfica de dichas matrices de manera que los resultados obtenidos en cada ensayo sean interpretables y comparables entre sí.

Una vez comentados los instrumentos utilizados para la recogida de datos a lo largo de los diferentes ensayos, se muestra una representación esquemática de su organización espacial en la zona o cámara de ensayos del túnel de viento. Tal y como se puede observar en la FIG, se procederá al uso de dos cámaras que, consecuentemente, dan lugar a dos campos de visión o FOV, iluminados por un único láser colocado en la zona superior del túnel de viento. Cada uno de los campos de visión posee unas dimensiones de 200 mm en dirección perpendicular al movimiento del fluido y 300 mm en dirección paralela al mismo.

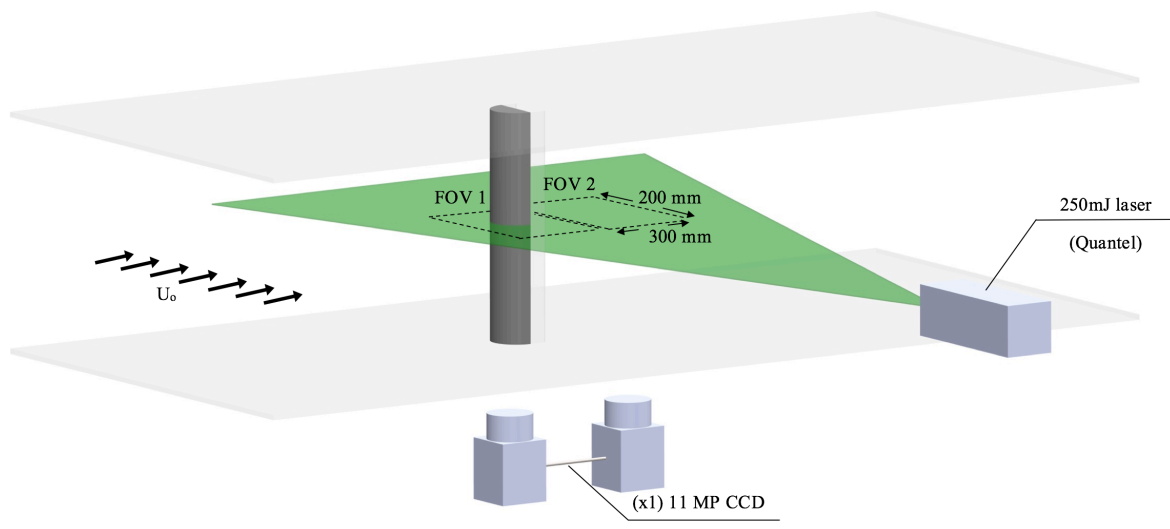


Figura 20. Disposición de la zona de ensayos

3.5 Ensayos

Una vez descritos todos los componentes que afectan considerablemente a los ensayos y, en consecuencia, a los resultados de dichos ensayos, se procede a la explicación del flujo de ensayos llevados a cabo. De esta manera, se pretende describir la razón de ser de dicho flujo, sus intenciones y consecuencias. Así mismo, al final de este apartado se puede encontrar un diagrama de flujo en el que se muestran los distintos ensayos llevados a cabo y la lógica que contiene el procedimiento llevado a cabo (Figura 21).

3.5.1 Primer grupo de ensayos: Ensayo 1

Tal y como se ha descrito a lo largo de capítulos anteriores de la presente tesis, los distintos mecanismos a ensayar son clasificados como elementos pasivos de control del flujo ya que no precisan de una fuente de energía externa para actuar sobre el comportamiento del flujo. Como consecuencia de ello, su simple instalación en el cuerpo base es suficiente para que el flujo modifique su comportamiento cuando se el conjunto se sumerge. Con el propósito de determinar el efecto de cada uno los mecanismos pasivos ensayados, se hace imprescindible una previa caracterización del

comportamiento del flujo alrededor del cuerpo base (en este caso, el cilindro de sección semicircular al descubierto, sin mecanismos o elementos que perturben el flujo a su alrededor) para, de esta manera, hacer posible la detección de los cambios que cada uno de los mecanismos efectúa tras instalarse en el cuerpo.

Dicho esto, trivialmente se advierte que el primer ensayo a llevar a cabo es aquel que permite la caracterización del flujo alrededor del cuerpo base, sin mecanismo de control alguno. Dado que se trata de la caracterización del cuerpo base, es necesaria la aplicación los dos campos de visión mostrados en la Figura 19 (FOV 1 y FOV 2). Sin embargo, a diferencia del segundo campo de visión mostrado, el primer campo de visión tan solo se utilizará en este ensayo ya que sus resultados pueden extrapolarse al resto de ensayos y, de esta manera, incrementar la eficiencia del conjunto de ellos. La razón de ello reside en la similitud del flujo aguas arriba del final del cilindro base (coincidente con la parte plana en la zona trasera del mismo) ya que, dada la igualdad en geometría y condiciones del flujo de entrada.

Por lo tanto, el primer objeto ensayado comprende dos ensayos diferentes, un primer ensayo de con el campo de visión FOV 1 para la caracterización del comportamiento del flujo aguas arriba del objeto, y un segundo ensayo que caracterizará el comportamiento del flujo aguas abajo del cuerpo base y, consecuentemente, utilizará el segundo campo de visión FOV 2.

3.5.2 Segundo grupo de ensayos: Ensayos 2, 3 y 4

Una vez finalizados los dos ensayos llevados a cabo con el cuerpo base, se procedió a la realización del segundo grupo de ensayos. En este segundo grupo de ensayos se compone de tres ensayos diferentes en los que se evalúa la acción de un mecanismo pasivo basado en la fijación de aletas rígidas externas a la estructura inicial o cuerpo base. Dichas aletas o flaps rígidos van, en todos los casos, fijadas en la parte trasera (aguas abajo) del cuerpo base, tal y como se muestra en la Figura 15.

Por otro lado, este grupo de ensayos tiene como objetivo principal el diagnóstico del efecto que las aletas rígidas tienen sobre la generación de vórtices y, con ello, la resistencia de arrastre. Asimismo, el objetivo secundario del mismo es la determinación de la longitud óptima de los flaps instalados de cara a la obtención de una mayor reducción en la fuerza de drag sobre el objeto base. De esta manera, este

grupo comprende, a su vez, tres ensayos en los que se varia la longitud de las aletas rígidas instaladas. De esta manera, se escogió un ensayo en el que la longitud de las aletas equivale a la longitud del diámetro del cuerpo base (esto es, 50mm), otro ensayo en el que dicha longitud se reduce a un cuarto de la longitud diametral (en este caso, 12.5mm) para, finalmente, realizar un tercer ensayo en el que se seleccionó una longitud de aleta igual a la tercera parte del diámetro (por lo tanto, una longitud de 16.67mm). la razón por la que se escogen estas longitudes son, en primer lugar, el establecimiento de fronteras a la hora de determinar los efectos de aletas rígidas. Por ello los ensayos con aletas de longitud igual al diámetro y de un cuarto del mismo, ya que se prevé que dichos ensayos correspondan a mecanismo pasivos cuyos resultados sean extremos en unos u otros aspectos. Finalmente, la razón por la cual se llevó a cabo un tercer ensayo con una longitud intermedia es trivial, la consecución de una solución intermedia a los extremos observados en los dos primeros ensayos de este segundo grupo. Por otro lado, el hecho de seleccionar una longitud equivalente a un tercio del diámetro del cuerpo base en vez de la selección de una longitud intermedia entre ambas dos soluciones ya ensayadas (lo que supondría una longitud de aleta equivalente a la mitad del diámetro), recae en la realización del estudio descrito anteriormente en Kunze, *et al.* En dicha publicación se justifica la utilización de aletas de longitud equivalente a un tercio del diámetro como la longitud óptima para la obtención de la máxima reducción de la fuerza de arrastre posible dentro de las capacidades y límites de este mecanismo de control. Dado este estudio, se decidió que una longitud de un tercio del diámetro supondría una respuesta mejor. No obstante, el objetivo del estudio de estas tres longitudes continúa siendo la selección de una longitud de aleta óptima, por lo que ambas tres se pusieron a evaluación una vez se obtuvieron los resultados de los ensayos correspondientes.

De esta manera, en este segundo grupo se llevaron a cabo tres ensayos en los que el campo de visión utilizado fue el FOV 2 ya que, tal y como se comenta en el apartado anterior, el campo de visión FOV 1 es únicamente necesario en el primer ensayo para la caracterización del flujo en esa zona dada la posibilidad de extrapolar los resultados obtenidos en este con el resto de ensayos. Como ya se comenta anteriormente, el flujo aguas arriba del cuerpo es idéntico en todos los casos, siendo aguas abajo donde se muestran las variaciones y efectos de cada uno de los mecanismos de control utilizados, siendo este, por lo tanto, el área de verdadero interés.

3.5.3 Tercer grupo de ensayos: Ensayos 5 y 6

Tras la realización de los ensayos anteriores, se procede a la evaluación de las aletas flexibles como mecanismo pasivo de control. Estas aletas flexibles, tal y como se comenta en capítulos anteriores de la presente tesis, están fabricadas de Caucho Natural para, de esta manera, favorecer el movimiento del flujo aguas abajo del modelo y, con ello, reducir la fuerza de drag soportada por este. En este tercer grupo de ensayos se llevarán a cabo dos ensayos independientes en los que la principal diferencia reside en la variación de la longitud de las aletas situadas. Tal y como se ha comentado antes, se utilizarán aletas de longitud equivalente a un tercio del diámetro (Ensayo 5) y de longitud equivalente al diámetro (Ensayo 6). La razón por la cual no se han llevado a cabo ensayos con aletas flexibles de longitud equivalente a un cuarto de la longitud del diámetro (tal y como ocurre en el segundo grupo de ensayos) se debe a la imposibilidad de lograr movimiento en dichas aletas. Esto es, longitudes menores a un tercio del diámetro (16.67mm) evitan que el material, independientemente de las propiedades elásticas que le caractericen, se comporte como tal. En contraposición, el material adquiere un comportamiento rígido que no aporta información útil a la investigación.

Además, la selección de la longitud de aletas equivalente al diámetro del cuerpo base y no otra (bien mayor o menor) permite establecer comparaciones con el segundo grupo de ensayos.

Tal y como puede advertirse y como ocurre en el segundo grupo de ensayos, el campo de visión aplicado durante este ensayo es el FOV 2 ya que el FOV 1 no aportaría mayor información que la obtenida en el primer grupo de ensayos.

3.5.4 Cuarto grupo de ensayos: Ensayo 7

Una vez realizados todos los ensayos de aletas rígidas y flexibles, a la vez que finalizados los ensayos de caracterización del flujo aguas arriba y abajo del cuerpo, se procede a ensayar la segunda técnica de mecanismos de control pasivos planteada en esta tesis. Esta es, tal y como se comenta anteriormente, la perforación longitudinal del cuerpo base en la creación de una ranura que divide en dos mitades idénticas al

cuerpo base inicial. Este mecanismo pasivo trata de equilibrar las presiones aguas arriba y aguas abajo del cuerpo con el objetivo de reducir la fuerza de arrastre sufrida por el cuerpo.

En este ensayo se procede a utilizar el mismo campo de visión utilizado en los grupos segundo y tercero de ensayos, es decir, el segundo campo de visión o FOV 2. Esto se debe a la gran importancia que posee el comportamiento del flujo aguas abajo del modelo frente a los efectos que la ranura pueda provocar aguas arriba del mismo. Asimismo, los datos aguas arriba pueden extrapolarse de los obtenidos en el primer grupo de ensayos dada la similitud entre ambos.

Una vez realizados todos los ensayos mencionados a lo largo de la presente investigación, se procedió al procesado de todos los datos recogidos en cada uno de los ensayos realizados. Este procesado permitirá dotar de orden y coherencia los datos obtenidos con los diferentes instrumentos utilizados en cada ensayo. De esta manera, se continuó con el análisis de los datos ya ordenados para, con ello, poder dotar de significado físico a los mismos, esto es, determinar las distintas influencias de cada mecanismo de control sobre el flujo alrededor del cuerpo, así como la determinación de sus beneficios o perjuicios.

A continuación se muestra un diagrama de flujo (Figura 21) que representa la sistemática seguida para la realización de cada uno de los ensayos y la posterior evaluación de resultados. Asimismo, se incluyen los puntos de evaluación del proceso y la comparativa que entre los resultados se llevará a cabo. Dicha comparativa será explicada con más detalle en el próximo capítulo, donde se muestran los resultados de cada ensayo y el análisis realizado de cada uno de ellos.



Figura 21. Diagrama de Flujo del procedimiento de ensayos

Una vez definidos los efectos de cada mecanismo de control y sus consecuencias a nivel general, es posible estudiar la viabilidad para su introducción en el mercado. Sin embargo, este será el objeto de estudio en los próximos capítulos del presente documento.

Capítulo 4

Análisis de los datos y resultados

En esta sección se procede a mostrar los datos obtenidos una vez el post-procesado de los mismos ha sido realizado. De esta manera, se pretende habilitar la comparación del comportamiento del flujo resultante de cada uno de los mecanismos de control instalados en el cuerpo base. Una vez estos resultados han sido analizados, se muestra la metodología utilizada para la obtención del valor de la fuerza de arrastre para cada uno de los ensayos, así como la resultante reducción obtenida tras la comparación de cada ensayo.

4.1 Resultados y caracterización del caso base

Los datos obtenidos tras el post-procesado de las mediciones realizadas durante los ensayos pueden diferenciarse en función de la variable a la que hacen referencia. De cara al principal objetivo del presente estudio, fueron cuatro las variables seleccionadas para su posterior análisis. Estas variables son la velocidad media del flujo en la dirección de la corriente (U), la velocidad media en el sentido perpendicular al movimiento del flujo libre (V), la energía cinética turbulenta (TKE por sus siglas en inglés – Turbulent Kinetic Energy) y los esfuerzos turbulentos en dirección normal a la pared ($u'v'$). De cara a la correcta comparación de las variables mencionadas, se llevará a cabo un primer análisis de los resultados obtenidos en el caso base. A partir de este caso se podrán observar las variaciones inducidas por cada mecanismo de control.

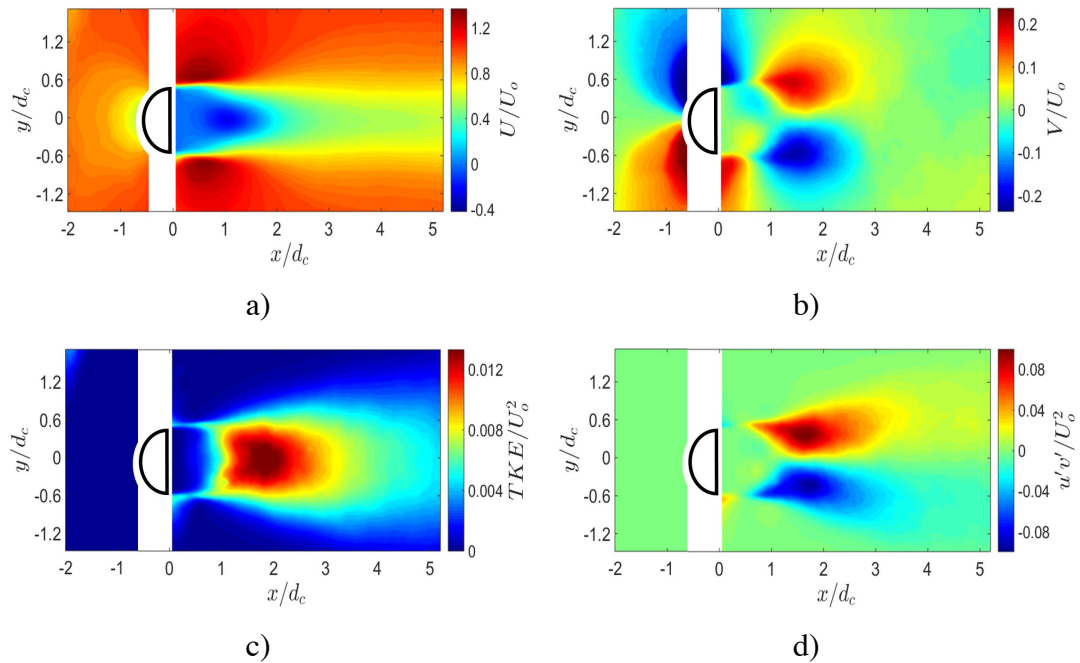


Figura 22. Caracterización de caso base según su a) Velocidad media en dirección al flujo libre; b) Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre; c) Energía cinética turbulenta y d) Esfuerzo turbulento

Tal y como se puede observar en la Figura 22, los valores observados en cada una de las variables analizadas están normalizados respecto de la velocidad de flujo libre (U_0), permitiendo así comparar y relacionar los diferentes valores dentro de una misma figura. De esta manera, la Figura 22a), relacionando velocidad media en dirección al flujo libre (U), muestra como el cuerpo base afecta considerablemente la zona aguas arriba del cilindro, provocando reducciones de hasta el 20% a distancias de $x/d_c = -2$. Asimismo, se observa un aumento en la velocidad (hasta un 20%, aproximadamente) en las zonas donde se encuentran las aristas vivas del cuerpo y donde presumiblemente tiene lugar la ruptura de capa límite. Esto también puede ser observado en la Figura 22c), donde la energía cinética turbulenta muestra un aumento del nivel de inestabilidad del flujo por debajo de $x/d_c = 1$, expresado a través de un aumento de los valores en esta zona de aproximadamente un 0,5%. Finalmente, es destacable la simetría respecto de la zona central del campo de visión de los esfuerzos turbulentos (Figura 22d)) y la velocidad perpendicular al flujo libre (Figura 22b)).

Una vez tratado el caso base, se procede a comparar cada una de las variaciones observadas en cada ensayo para cada mecanismo de control utilizado. A continuación se muestran con detalle los resultados obtenidos tras el análisis de cada una de las variables.

4.2 Velocidad media en dirección paralela al flujo libre

La primera variable comparada para cada caso es aquella referida a la velocidad media del flujo en la dirección del movimiento de la corriente libre. En la Figura 23 se observan los resultados obtenidos para cada mecanismo de control. Tal y como se puede observar, se han suprimido los campos de velocidades referidos a los mecanismos de control por aletas flexibles (tanto el mecanismo de aletas con longitud $x/d_c = 1$ como $x/d_c = 1/3$) ya que su enorme similitud con las aletas flexibles lo permite. Sin embargo, las figuras referidas a dichos campos de velocidad pueden encontrarse en el Anexo A del presente documento.

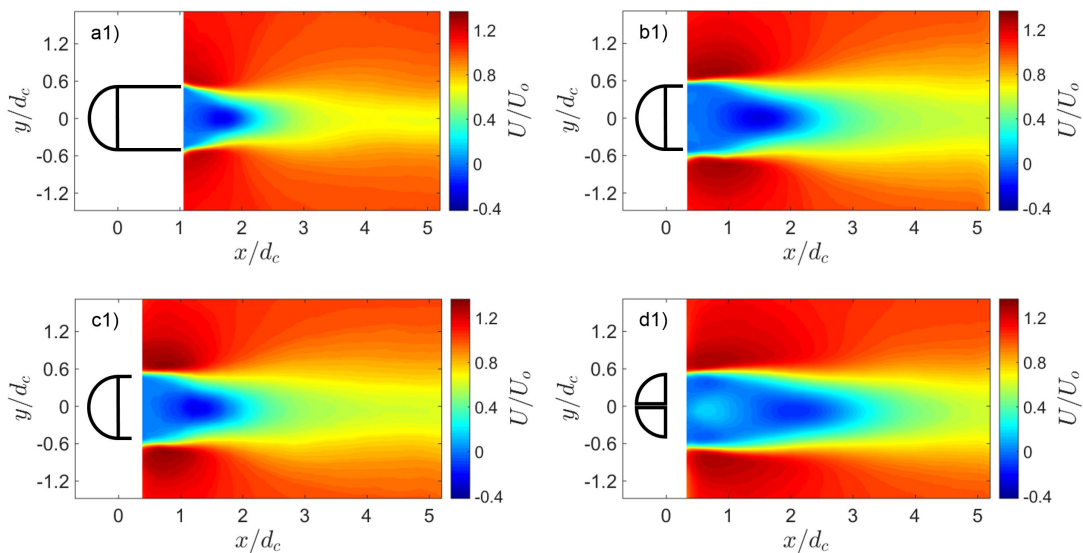


Figura 23. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre, U ; a1) Aletas rígidas de $x/d_c = 1$; b1) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/3$; c1) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/4$ y d1) Ranura longitudinal

Tal y como se puede observar en la Figura 22 a), el pico de velocidad mínima se encuentra a una distancia de $x/d_c = 1$. En él se observan valores ligeramente menores a cero. Si se compara este caso con aquel en el que se han añadido aletas de diversas longitudes, se puede observar que la distancia a la cual tiene lugar dicho mínimo es inversamente proporcional a la longitud de las aletas que componen el mecanismo en cuestión. De esta manera, el vórtice generado con las aletas de longitud equivalente al diámetro del cuerpo base tiene lugar a una distancia aproximada a $x/d_c \approx 2$ (Figura 23 a1)) mientras que, para el mecanismos de aletas de longitud equivalente a un cuarto

del diámetro, este vórtice tiene su punto de mínimo valor a una distancia ligeramente menor a $x/d_c \approx 1.5$ (Figura 23 b1)). Trivialmente se deduce que la distancia a la cual se encontrarán los valores mínimos del vórtice generado en el caso de aletas de longitud $l/d_c \approx 1/3$ será intermedia a las dos distancias de los casos anteriores, es decir, alrededor de $x/d_c \approx 1.5$, tal y como se muestra en la Figura 23 c1).

Por otro lado, se observa un comportamiento ligeramente distinto en el caso del mecanismo por ranura longitudinal. En este, la ranura permite el paso del flujo por la zona central del cilindro, aumentando la velocidad del aire en la parte inmediatamente posterior al cuerpo base. Estos aumentos alcanzan valores de hasta un 20%. Estos incrementos se deben a una inyección de momento que crea el pico de valores a una distancia cercana a $x/d_c \approx 0.5$ y, en consecuencia, desplaza considerablemente la distancia en la que el vórtice de valores mínimos tiene lugar hasta posiciones aproximadas de $x/d_c \approx 2.25$. Finalmente, es necesario mencionar el aumento de valores del campo de velocidades que supone el mecanismo por ranura, el cual posee mínimos mucho más cercanos al cero que el resto de velocidades.

Con el objetivo de evaluar con mayor profundidad la distribución de velocidades a lo largo de la dirección paralela al movimiento del flujo libre, se llevó a cabo un análisis en una dimensión del perfil de velocidad que contiene la línea central del campo de visión utilizado (Figura 24).

Esta gráfica muestra con total claridad la relación inversa comentada entre la longitud de las aletas y el punto de mínimas velocidades. Además, el incremento de velocidades que implica la ranura longitudinal es fácilmente identificable. Además, en esta gráfica se puede observar la distancia que existe entre los picos máximos (al final del campo de visión) y mínimos (en la zona en la que se desarrolla el vórtice) para cada mecanismo. Mientras el mecanismo por aletas de mayor longitud ($l/d_c = 1$) sólo precisa de una distancia cercana a los dos diámetros para regularizar su flujo aguas abajo, el mecanismo por aletas de menor longitud ($l/d_c = 1/4$) requiere de más de 3 diámetros de distancia pico-pico para alcanzar dicho estado.

Por último, se puede comprobar el mencionado aumento de la suavidad en el perfil correspondiente a la velocidad del flujo en el caso de la ranura longitudinal, alcanzando valores mínimos significativamente mayores a los observados en el resto de mecanismos.

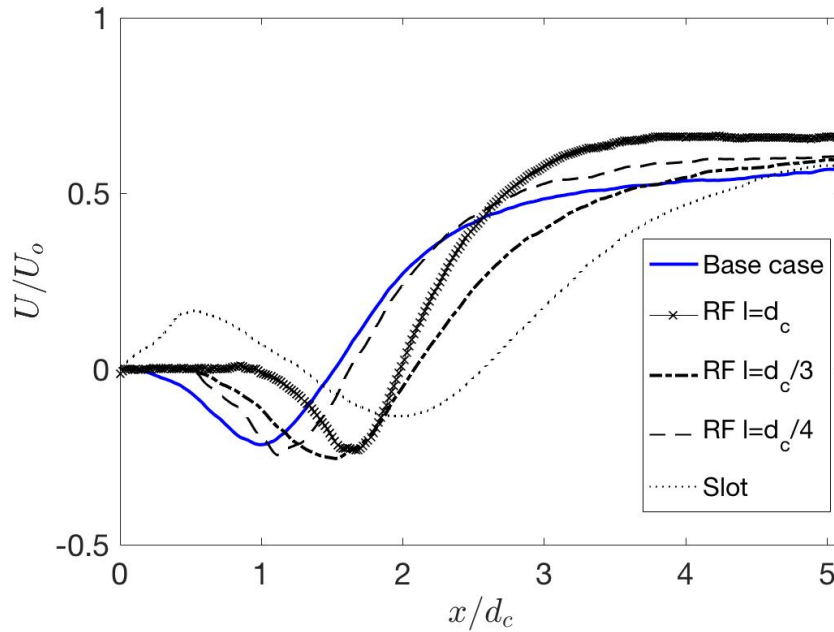


Figura 24. Perfil de velocidades de la línea central para cada uno de los mecanismos representativos

En futuras secciones, los datos analizados de esta variable serán utilizados para el cálculo del valor de la fuerza de arrastre que corresponde a cada uno de los mecanismos y, en consecuencia, la variación porcentual de esta respecto al valor arrojado en el caso base.

4.3 Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre

Tal y como ocurre con la variable anterior, en la Figura 25 sólo se muestran aquellos resultados referentes a los mecanismos de aletas rígidas y no los correspondientes a los mecanismos de aletas flexibles pues, para el análisis a realizar, los primeros pueden considerarse como suficientemente representativos. Sin embargo, el resto de campos de velocidad perpendicular al flujo libre pueden encontrarse en el Anexo B del presente documento.

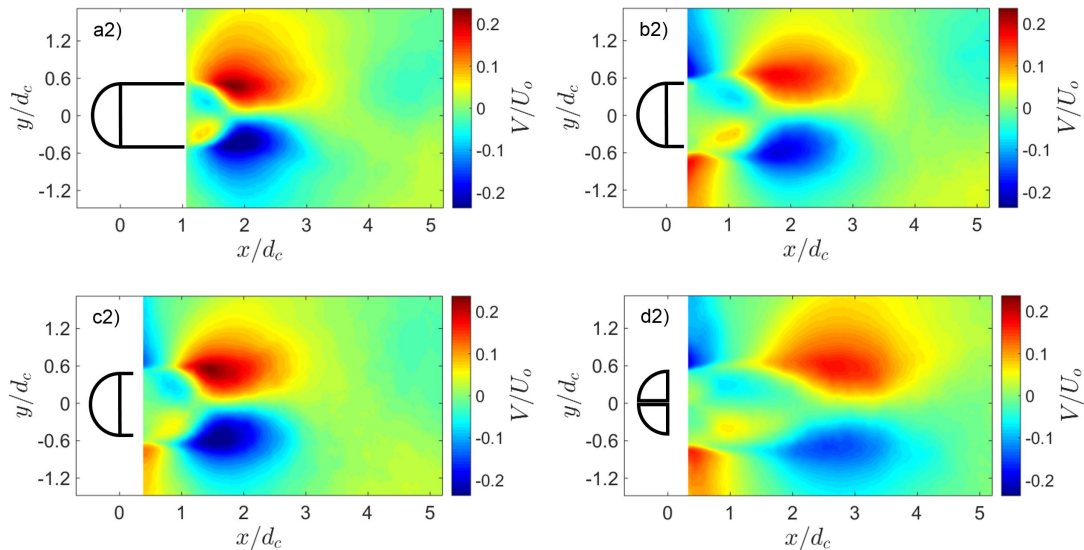


Figura 25. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre, U ; a2) Aletas rígidas de $x/d_c = 1$; b2) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/3$; c2) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/4$ y d2) Ranura longitudinal

En este segundo caso es necesario destacar la gran simetría existente entre el plano superior e inferior de las figuras, lo cual indica un equilibrio de esfuerzos laterales en el cuerpo ensayado, independientemente del mecanismo de control utilizado.

Por otro lado, en esta variable la principal variación que surge entre los diferentes mecanismos en relación con el caso base se reduce a la distancia en la que tiene lugar el pico de valores, al igual que la distancia a la cual aparecen. En concreto, esta diferencia es significativa en el caso del mecanismo por ranura longitudinal. En él, dicho pico de valores tiene lugar a una distancia aproximada de tres diámetros de la parte trasera del cilindro mientras que, en el resto de mecanismos, dicha distancia se ve considerablemente reducida a $x/d_c \approx 2$ (Figura 25).

De cara a la diferenciación entre los diferentes mecanismos por aletas, también se puede observar una ligera diferencia en la distancia a la que tiene lugar el pico de velocidades. En este caso, la longitud de las aletas supone un desplazamiento hacia la derecha de dicho punto. Por ello, en el caso de aletas de longitud $l/d_c \approx 1$, esta distancia equivale a $x/d_c \approx 2$, mientras que en el caso de aletas de longitud $l/d_c \approx 1/4$, la reducción se observa a $x/d_c \approx 1.75$, aproximadamente.

De igual manera, entre el caso del mecanismo por ranura y el resto de mecanismos, se observa una notable diferencia en los valores alcanzados en los mencionados picos de velocidad. Mientras en los mecanismos por aletas se observan valores superiores al 20%, en el caso del mecanismo por ranura no se sobrepasa el 15%. De nuevo, esta

reducción se debe a la inyección de momento que imprime la ranura aguas abajo del cilindro, en la zona inmediatamente posterior al mismo. De cara a mejorar la contundencia y el rigor del análisis llevado a cabo, se muestra la gráfica de la velocidad vertical a una distancia de $x/d_c \approx 5$ (Figura 26). En esta imagen se observa claramente la simetría comentada anteriormente, así como la demostración de un flujo prácticamente desarrollado en su totalidad a dicha distancia del objeto, con independencia del mecanismo de control utilizado.

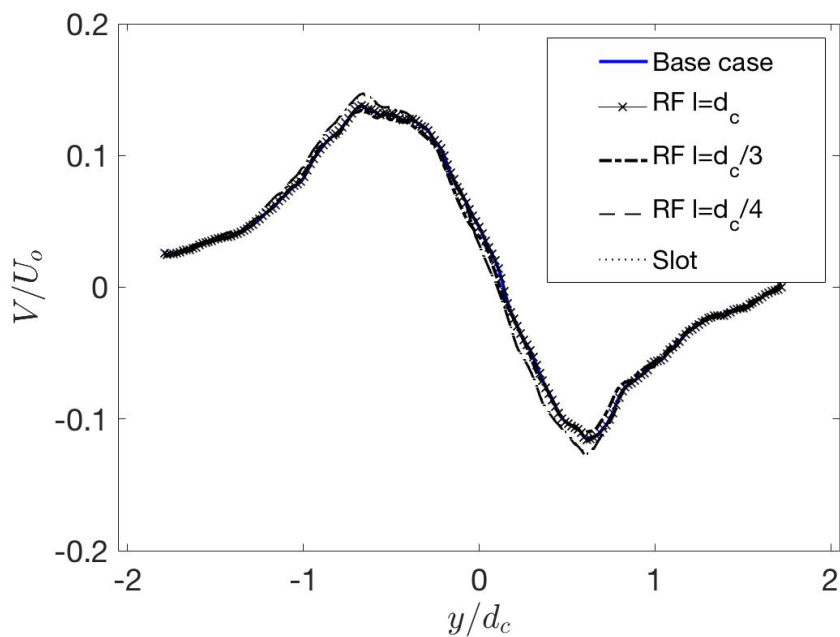


Figura 26. Perfil de velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre a una distancia $x/d_c = 5$

4.4 Energía cinética turbulenta

En el caso de la energía cinética turbulenta que cada mecanismo muestra, se muestran los campos de valor representativos. Por esta razón, los datos relativos a los mecanismos de control por aletas flexibles son únicamente mostrados en el Anexo C de este documento. Por otro lado, el resto de resultados pueden observarse en la Figura 27, mostrada a continuación.

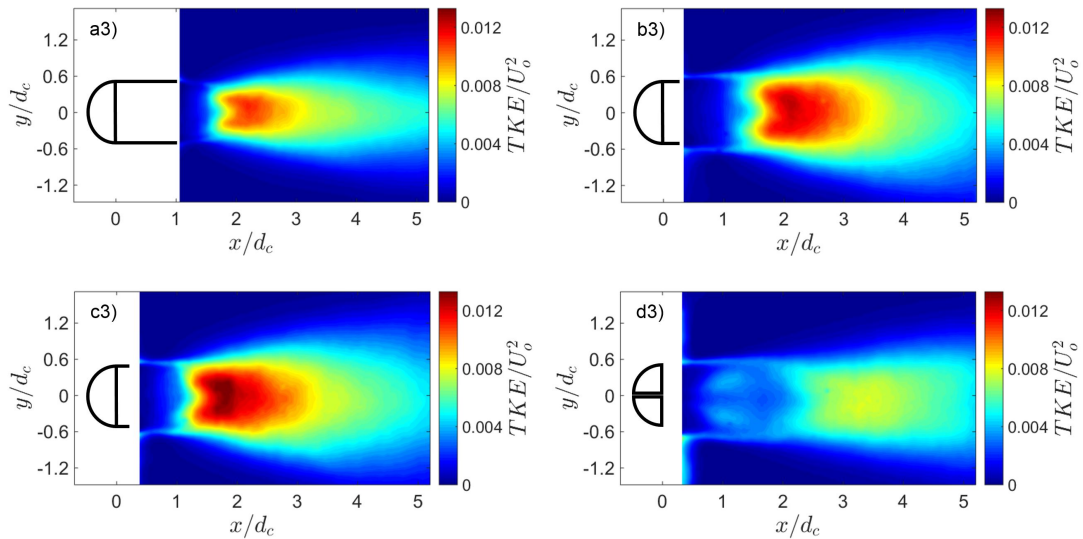


Figura 27. Energía cinética turbulenta; a3) Aletas rígidas de $x/d_c = 1$; b3) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/3$; c3) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/4$ y d3) Ranura longitudinal

En relación a los resultados arrojados por esta variable en cada uno de los casos, se puede comentar que es donde más diferencias se pueden advertir entre cada uno de ellos y los resultados del caso base (Figura 27). En primer lugar, es significativo no sólo la posición en la que aparecen los valores máximos, sino precisamente las diferencias entre dichos valores. Se puede observar como a medida que la longitud de las aletas aumenta, el nivel de turbulencia observado se ve drásticamente reducido, pasando de valores cercanos a $TKE/U_o^2 \approx 0.016$ en el caso de $l/d_c \approx 1/4$; a valores menores a $TKE/U_o^2 \approx 0.01$ en el caso de $l/d_c \approx 1$. Paralelamente, el punto en el que estos máximos tienen lugar va también acercándose al cilindro base a medida que dichas aletas son reducidas en longitud. Por ello, se observa como el punto de valores máximos se sitúa en $x/d_c \approx 2$ en el caso de las aletas de longitud $l/d_c \approx 1$, mientras que este punto se acerca a $x/d_c \approx 1.5$ con el mecanismo por aletas de longitud $l/d_c \approx 1/4$.

Sin embargo, las mayores diferencias se encuentran al comparar estos resultados con los obtenidos en el caso del mecanismo por ranura. En él, el nivel de turbulencia se ve enormemente afectado dada la inyección en la zona inmediatamente posterior al cilindro, alcanzando una reducción del 70% en relación al valor obtenido en el caso base a una distancia de $x/d_c \approx 1$.

Por otro lado, es necesario comentar el efecto que los diferentes mecanismos implican en la dirección perpendicular al movimiento del flujo libre. En dicho caso, las aletas de mayor longitud muestran una considerable reducción de envergadura en

relación al resto de casos, lo que demuestra un menor efecto de turbulencias aguas abajo del objeto. Es decir, afecta considerablemente a la esbeltez del efecto turbulento generado aguas abajo. En relación al contorno que dibuja la energía cinética turbulenta por efecto de los diferentes mecanismos, destaca la rectitud del nivel de turbulencias tras el mecanismo por ranura, en contraposición a la expansión en dirección perpendicular que aparece en los casos de mecanismos por aletas.

De cara a analizar con mayor profundidad el comportamiento del nivel de turbulencia tras el objeto con los diferentes mecanismos, se ha procedido a realizar una gráfica unidimensional en la que se representa el perfil de valores correspondiente a la línea central del campo de visión a lo largo de la dirección del flujo libre (Figura 28).

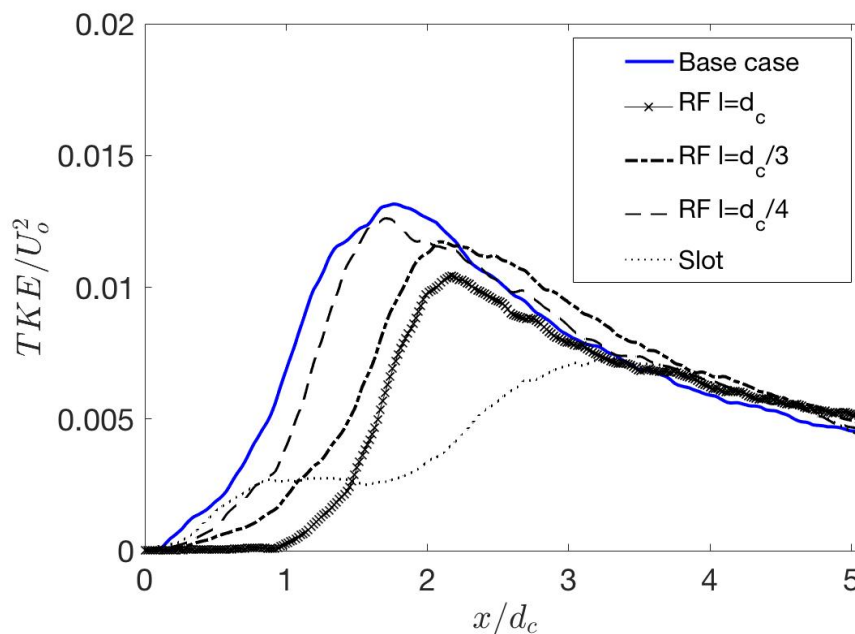


Figura 28. Perfil de TKE a lo largo de la línea central del campo de visión

En la figura mostrada, se observa claramente como existe una relación de proporcionalidad indirecta entre el valor del nivel de turbulencias máximo y la longitud de las aletas implantadas. Asimismo, se observa claramente como el mecanismo por ranura longitudinal deriva en una reducción considerable del nivel de turbulencias en relación al caso base y al resto de mecanismos por debajo de $x/d_c \approx 3$.

4.5 Esfuerzos turbulentos

Siguiendo las mismas directrices que en los casos anteriores, a continuación se muestran los resultados relativos a los mecanismos representativos estudiados, dejando de lado aquellos que muestran mayor irrelevancia para el análisis. Sin embargo, dichos resultados pueden observarse en el Anexo D, presente al final del presente documento.

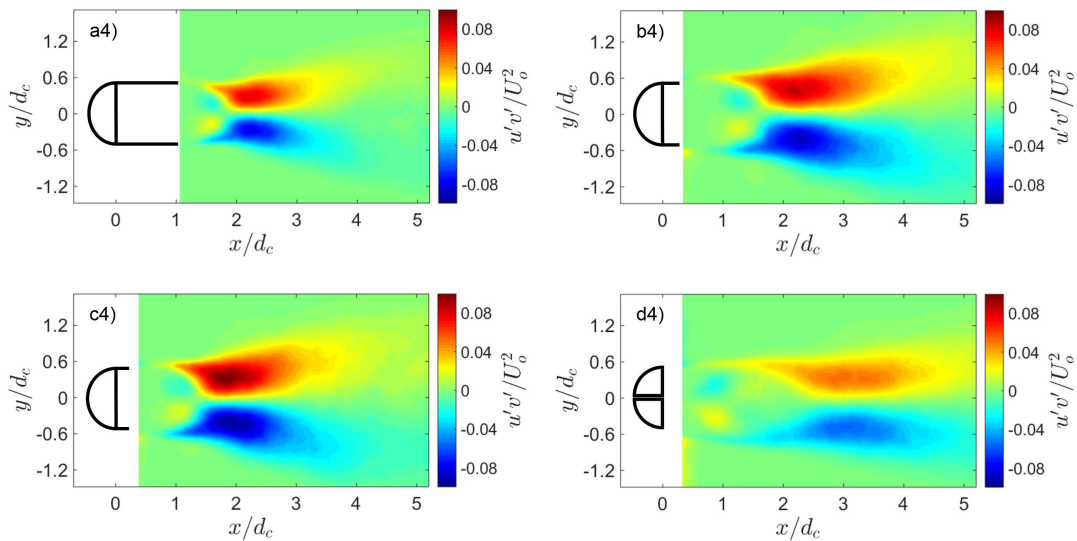


Figura 29. Esfuerzos turbulentos en dirección normal a la pared; a4) Aletas rígidas de $x/d_c = 1$; b4) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/3$; c4) Aletas rígidas de $x/d_c = 1/4$ y d4) Ranura longitudinal

Tal y como puede observarse en la Figura 29, los esfuerzos turbulentos varían tanto en valor como en dispersión en función de la longitud de aletas utilizada. Si bien con las aletas de mayor longitud se alcanzan valores máximos de $u'v'/U_o^2 \approx 0.06$, con las aletas de menor longitud este valor asciende hasta $u'v'/U_o^2 \approx 0.1$. Asimismo, la dispersión de datos cuando $l/d_c = 1$ es significativamente menor a la obtenida en el caso de $l/d_c = 1/4$. Además, se ha de resaltar que en ningún caso se pierde simetría respecto del plano central del campo de visión.

En cuanto al mecanismo por ranura, destaca la gran reducción de valores dada la inyección de flujo por la zona central, así como la consecuencia de ello en la longitud del efecto. Esto es, los efectos obtenidos aguas abajo en cualquiera de los mecanismos de aletas implantados no superan distancias equivalentes a $x/d_c = 4$, mientras que en el caso del mecanismo por ranura, este efecto sigue estando presente en $x/d_c = 5$.

4.6 Fuerza de arrastre

Por último, y una vez obtenidos los resultados referentes a las cuatro variables mencionadas, se procedió al cálculo de los valores de la fuerza de arrastre que cada ensayo proporcionó. Estos cálculos se llevaron a cabo a partir del método de momentos entre el flujo aguas arriba y aguas abajo del objeto, tal y como se describe en Schlichting, H. En este método, la fuerza de arrastre y su coeficiente aerodinámico quedan definidas como:

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho AU_o^2}; \quad D = \rho \int_{-\infty}^{\infty} U(U_o - U) dy \quad (2)$$

Donde ρ es la densidad del aire, U_o es la velocidad del flujo libre, U es el valor de la velocidad media para cada intervalo dy y C_d es el coeficiente aerodinámico a la altura en la que fue obtenido el perfil de velocidades, U . En esta ocasión, la expresión integrada en la Eq.2 muestra un comportamiento particular cuando los valores de U integrados superan la mitad del valor de la velocidad de flujo, U_o . De esta manera, la expresión integrada incrementa su valor al incrementar U cuando $U/U_o \leq 0,5$. Mientras, la expresión integrada disminuye al aumentar U cuando $U/U_o \geq 0,5$. Por lo tanto, el valor de la fuerza de arrastre requiere ser calculado en aquellas distancias en las cuales no se sobrepasa la barrera fijada y, en consecuencia, todos los valores del perfil están gobernados bajo el mismo comportamiento. Por lo tanto, la distancia escogida para evaluar la fuerza de arrastre en cada caso fue $x/d_c = 4,5$, en la que la ratio de máximo valor entre U y U_o es $U/U_o = 0,47$. Para aumentar la contundencia de los análisis y mejorar el entendimiento de los mismos, se muestra la gráfica con los perfiles de velocidad de cada ensayo realizado (Figura 30).

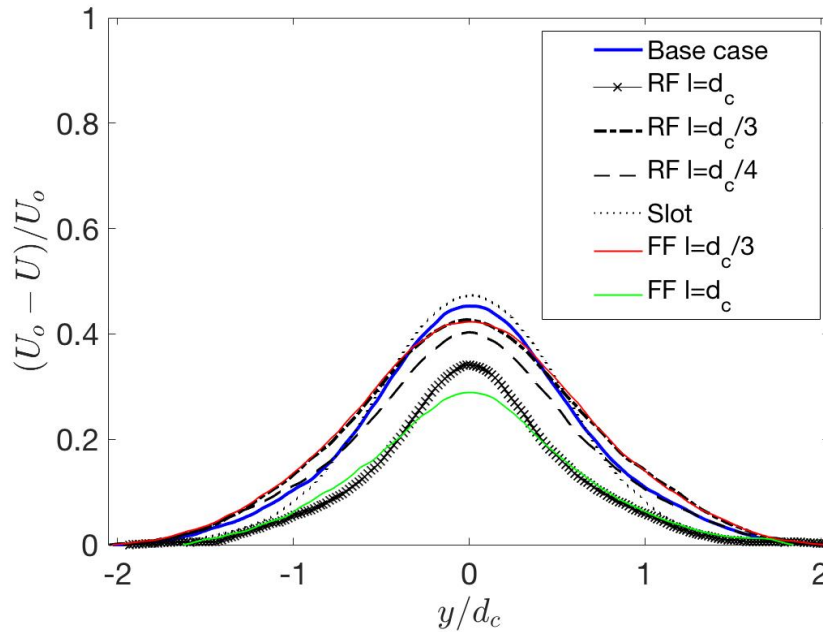


Figura 30. Perfil de velocidad media a $x/d_c = 4,5$

En dicha figura se puede advertir cuál de los ensayos utilizados proporcionará un mayor valor de fuerza de arrastre. Dada la característica intrínseca que posee la expresión integrada, se ha de tener en cuenta que aquella zona baja de la gráfica otorga mayores valores de drag pues la segunda componente ($U-U_0$) incrementa el valor total de la expresión frente al aporte del primer factor (U). Con el objetivo de aclarar este concepto, se muestra la Figura 31. En ella se puede observar la contribución a la fuerza de arrastre de cada uno de los puntos del perfil en cada ensayo realizado. La integral de dichos datos a lo largo de todo el perfil dará lugar a la fuerza de arrastre total de cada mecanismo ensayado, D . En dicha figura se observa como los mecanismos que menor fuerza de drag ofrecerán son aquellos correspondientes a los de aletas de mayor longitud. Entre ambos, la diferencia principal reside en la mayor pérdida de velocidad en la zona central que tiene lugar con el mecanismo por aletas rígidas frente al mecanismo por aletas flexibles. Sin embargo, el mecanismo por aletas flexibles ofrece una zona de déficit mayor que la ofrecida por el mecanismo de aletas rígidas, estrechando la curva por sus costados.

Por otro lado, se puede observar como los mecanismos basados en aletas rígidas y flexibles de longitud $l/d_c = 1/3$ no ofrecen curvas de mayor área que la ofrecida por el caso base y, por lo tanto, se espera un mayor valor de drag para estos mecanismos. Este efecto es principalmente causado por un ensanchamiento de la curva de

velocidades mostrada en la Figura 30, lo cual ofrece un peso mayor que la reducción de drag debida al menor déficit de velocidad que ofrecen en la zona central del cilindro. El hecho de que ambas curvas posean un parecido tan grande es, en parte, esperable, pues se da la posibilidad de que la longitud de las aletas flexibles no fuese suficiente como para permitir el aleteo de las mismas al pasar el flujo. Finalmente, el valor de drag asociado al mecanismo de aletas rígidas de longitud $l/d_c = 1/4$ ofrece una gráfica en la que el déficit de velocidad de la zona central se ve reducido respecto al del caso base, mientras mantiene la curvatura en por debajo del caso base en el resto del perfil. De esta manera, se espera una reducción de drag (aunque menor que en los caso de aletas de longitud $l/d_c = 1$).

Por último, el perfil correspondiente al mecanismo por ranura longitudinal presenta un mayor déficit en la zona central del cilindro pese a que las zonas laterales muestran una regularización mucho más rápida, lo que hace suponer que el drag total del cuerpo se verá reducido respecto al obtenido en el caso base.

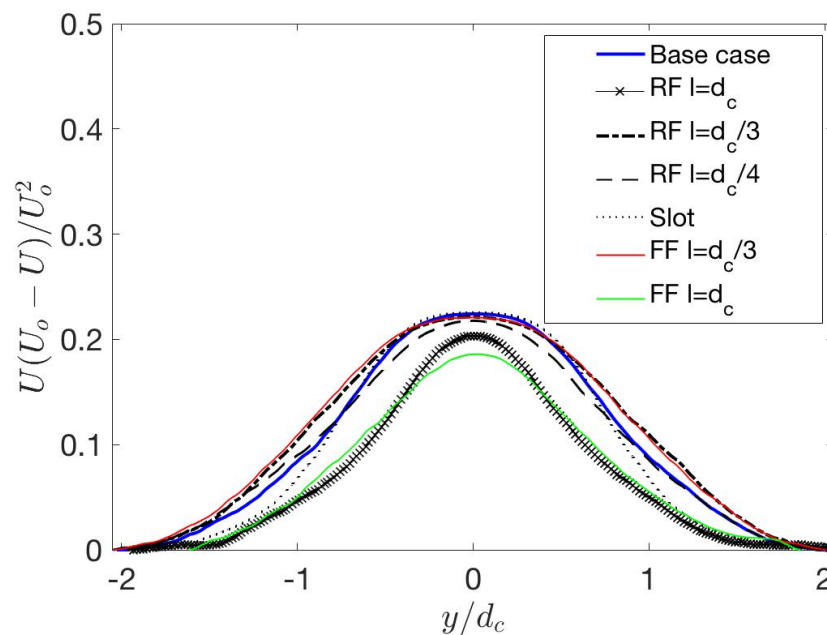


Figura 31. Contribución en el drag de cada punto

Una vez comentadas las gráficas que dan lugar a los valores de drag obtenidos tras la aplicación de las ecuaciones mostradas en Eq.2, se muestra la tabla en la que se representan dichos valores y, en concreto, la variación que cada mecanismo presenta frente al caso base (Tabla 6).

Tabla 6. Coeficiente aerodinámico en función del mecanismo utilizado

Mecanismo pasivo	$C_d/C_{\text{caso base}}$	% Reducción
Caso base	1,000	0,0%
Aletas rígidas ($l/d_c = 1$)	0,692	30,8%
Aletas rígidas ($l/d_c = 1/3$)	1,077	-7,7%
Aletas rígidas ($l/d_c = 1/4$)	0,976	2,4%
Aletas flexibles ($l/d_c = 1$)	0,704	29,6%
Aletas flexibles ($l/d_c = 1/3$)	1,092	-9,2%
Ranura longitudinal	0,939	6,1%

Tal y como se observa en la tabla mostrada, el mecanismo que mayor reducción de la fuerza de drag propone es aquel correspondiente al de aletas rígidas de mayor longitud, $l/d_c = 1$, tal y como se había previsto tras el análisis de las gráficas previas (Figura 30 y Figura 31). Esta reducción del 30,8% va estrechamente seguida de la reducción propuesta por el mecanismo de aletas flexibles de longitud $l/d_c = 1$, el cual ofrece una reducción del 29,6%; tan sólo un 1,2% de diferencia. De igual manera, se observa como los mecanismo por aletas de longitud $l/d_c = 1/3$ empeoran el resultado del caso base mientras que el mecanismo por aletas de longitud $l/d_c = 1/4$ tan sólo otorga una ligera reducción del 2,4%. Finalmente, el mecanismo por ranura longitudinal proporciona una mejora del 6,1% respecto al caso base, dada la comentada estrechez en la base del perfil de velocidad (Figura 30).

Capítulo 5

Análisis de viabilidad económica y cálculo de emisiones

En este capítulo se trata el segundo objetivo de la presente investigación. Una vez realizados los análisis pertinentes en lo que al estudio de la mecánica de fluidos y el comportamiento de cada uno de los mecanismos, se procede a realizar un breve análisis económico de cada uno de ellos. En dicho análisis se tratará de evaluar el impacto que cada uno de los mecanismos supondría en el caso de que fuesen llevados a la práctica y, por lo tanto, implantados en una flota de vehículos. Dado que esta investigación tan sólo representa un primer paso en la mejora de elementos pasivos para el control del flujo, la evaluación presentada es una mera estimación de lo que un mecanismo similar desarrollado en su totalidad como para ser apto para su disposición en un retrovisor actual, pero con los mismos resultados aerodinámicos, supondría.

De esta manera, se presenta una estructura clara para dicho análisis. Inicialmente se mostrará el procedimiento utilizado para la estimación de los principales costes que la implantación del mecanismo supondría (material, instalación, etc.). Tras ello, los ingresos asociados a la instalación del mecanismo serán evaluados para la flota de vehículos propuesta, en este caso, 40.000 vehículos. Se explicará la lógica seguida para obtener dicho cálculo en cada mecanismo. Finalmente, se compararán los resultados obtenidos en relación al coste y a los beneficios de cada mecanismo, proponiendo aquél que mejor relación coste-ingreso, es decir, el beneficio asociado al mecanismo que ofrezca mejor ratio.

Una vez realizado el análisis de viabilidad económica de los mecanismos ensayados, se evaluará el análisis de emisiones relativo a cada uno de ellos. Para ello, se expondrá la metodología seguida y el procedimiento utilizado para la consecución de los datos. Finalmente, se mostrará el impacto ecológico o “huella ecológica” del mecanismo que mejores resultados ofrezca.

5.1 Análisis económico

Tal y como se ha mencionado anteriormente, en el análisis se expondrán cada una de las entradas, esto es, costes e ingresos, de cara a la obtención de una comparativa de los beneficios que cada tecnología implica desde el punto de vista económico. Para ello, se comenzará describiendo la hoja de costes de cada mecanismo, posteriormente se hará lo propio con los ingresos que cada caso implicaría si la tecnología fuese implantada en una flota de 40.000 vehículos de dimensiones estándar en función del volumen de ventas en España de cada tipo de vehículo a lo largo del año 2015, tal y como se explicará más adelante. Finalmente, se mostrará el balance de beneficios de cada mecanismo y se propondrá aquel que mejores resultados otorgue.

5.5.1 Costes de implantación de cada mecanismo

De cara a la evaluación de los costes asociados a la implantación de los mecanismo ensayados en un vehículo real, se ha procedido de manera sistemática de cara a los beneficios comparativos que esta metodología implica. De esta manera, se procedió al cálculo del material a comprar para la elaboración de los mecanismos con aletas. Tal y como se explica en la Sección 3.2.2, los materiales de las aletas son dos, plástico acrílico para las aletas rígidas y caucho natural para las aletas flexibles. En ambos casos se calcularos los costes necesarios para el aprovisionamiento y maquinado de 160.000 aletas (el equivalente de aletas necesarias para cubrir una flota de 40.000 vehículos). En el caso de las aletas de plástico acrílico, se utilizó información de un proveedor regular de placas de plástico con las características requeridas y se seleccionó aquel pedido de placas (en volumen de placas y tamaño de las mismas) que ofreciese una solución más económica. Para el caso de las aletas flexibles se llevó a cabo un planteamiento equivalente.

Por otro lado, se llevó a cabo un cálculo optimizado del número de aletas que de una placa pudieran obtenerse, de manera que se redujese el número de placas necesarias. Una vez sabido el volumen de material necesario, se utilizaron datos de las pertinentes compañías para la obtención del coste de distribución que dicho pedido supondría.

Una vez calculado el coste referido al aprovisionamiento del material, se procedió al cálculo del pegamento necesario para poder unir el mecanismo al cuerpo. Como modelo a seguir, se calculó el coste asociado al pegamento utilizado para realizar los ensayos. Si bien este elemento puede sufrir enormes alteraciones, en este análisis se muestra el caso más desfavorable. Para este cálculo se evaluó el volumen de pegamento utilizado para elaborar los mecanismo ensayados y se extrapoló dicha cantidad a la escala pertinente. De esta manera y utilizando un proveedor de pegamentos regular, se procedió al cálculo del valor total del pedido.

Finalmente, el último coste asociado al material proviene de la adquisición de la maquinaria necesaria para manipular y fabricar las aletas. En este caso, se propuso la compra de una máquina similar a la utilizada para la elaboración de las aletas, esto es, una máquina de corte laser.

Una vez calculadas las diferentes entradas a la hoja de costes, se puede proceder al cálculo del coste total de implantación del mecanismo. Sin embargo, al coste de las tres entradas se le ha sumado un porcentaje adicional supuesto para cubrir los posibles fallos que puedan tener lugar, el aprendizaje de los operadores necesarios, y otros factores que influyan en el proceso. A continuación se muestra una tabla en la que se aplica el procedimiento explicado. De cara a que la utilidad de la tabla quedaría mermada si los costes asociados a todos los mecanismo fueran expuestos, se muestra aquella relativa al mecanismo que mayor reducción de drag ofreció, esto es, el mecanismo de aletas rígidas de longitud $l/d_c = 1$.

Tabla 7. Análisis de costes

<i>Aletas rígidas $l/d_c = 1$</i>	
Número de vehículos con la tecnología	40.000,00
Número de aletas necesarias	160.000,00
Número de aletas por placa	72,00
Número de placas necesarias	2.223,00
Precio unitario placa ²	52,61 €
Distribución	880,00 €
Coste extra del material	116.952,03 €

² Datos de www.eplastics.com

Pegamento para 10 aletas (g)	28,35
Pegamento para el total de aletas (kg)	453,59
Número de botes de pegamento (1,5kg)	303,00
Coste unitario del bote ³	26,62 €
Coste total del pegamento	8.065,86 €
<hr/>	
Coste de la maquinaria de corte ⁴	165.000,00 €
Incremento del 10%	29.001,79 €
Coste total	319.019,68 €

En relación al coste de implantación del mecanismo por ranura longitudinal, al carecer de material o pegamento necesario por su implantación, su coste se reduce a la adquisición de la máquina utilizada para elaborar la ranura.

De cara a proporcionar información acerca del coste que cada mecanismo supondría, se presenta la Figura 32, en la que se muestra un gráfico con los diferentes costes que cada mecanismo supondría.

³ Datos de <http://www.resineco.com>

⁴ Datos de <http://www.mercadolibre.com>

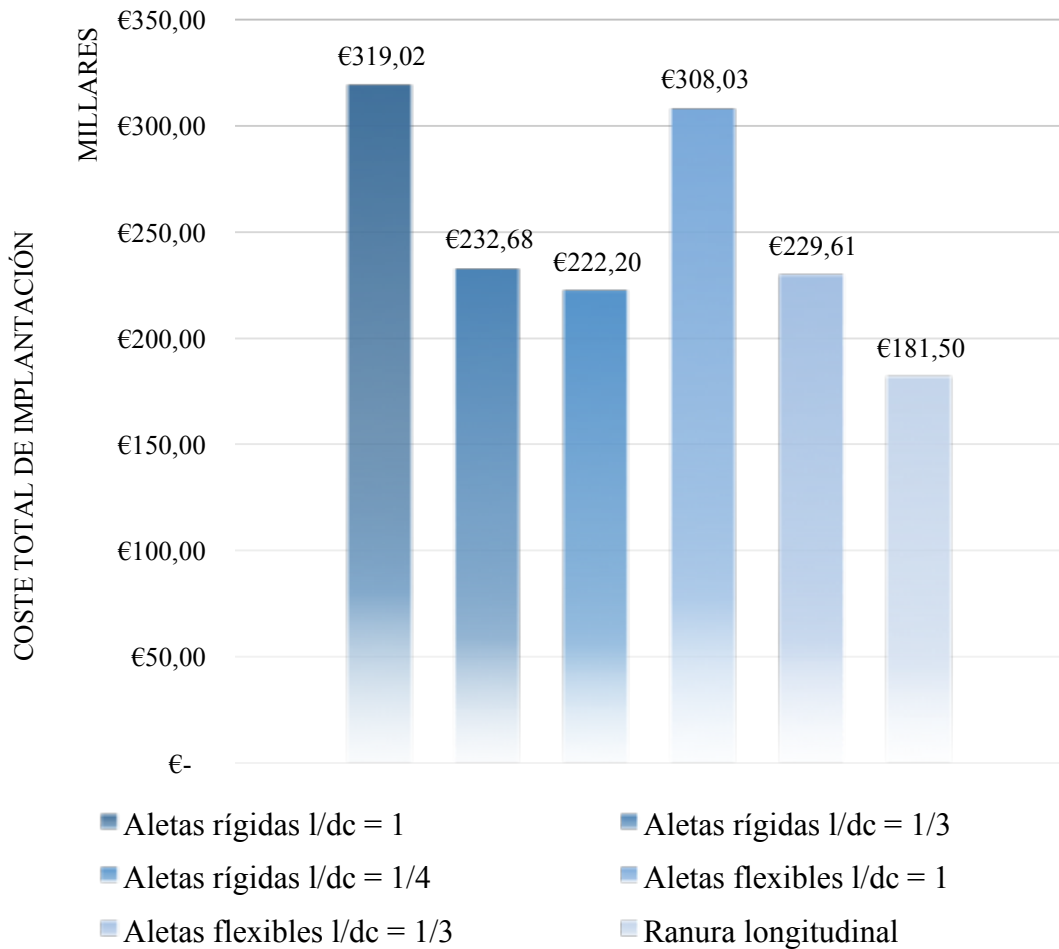


Figura 32. Coste total de implantación por mecanismo

Tal y como se puede observar en la Figura 32, los mecanismos que mayor coste suponen son aquellos que más material requieren, esto es, aquellos relacionados con las aletas de mayor longitud ($l/d_c = 1$), tanto rígidas como flexibles.

Para mayor interés, se puede consultar el detalle de los costes de implantación de todos los mecanismos ensayados, situado en el Anexo E-1.

5.5.2 Ingresos obtenidos tras la implantación del mecanismo

Una vez calculados los costes asociados a la implantación de los mecanismos ensayados, se procedió a realizar el cálculo de los ingresos que cada uno de ellos supondría dada la reducción de drag que cada uno de ellos propone y la influencia de este sobre la reducción del drag del vehículo en su totalidad. Inicialmente es necesario llevar a cabo una aclaración. En este caso los ingresos son contemplados como ahorro

de un gasto en combustible que, de no poseer el mecanismo, se incurriría inevitablemente.

De esta manera, se parte de los datos recogidos en Mimeau, C. *et al.*, donde se expresa una influencia de los retrovisores sobre el drag del vehículo completo de hasta un 10%. Tomando este dato y sabiendo que la influencia entre la resistencia aerodinámica de un vehículo y el gasto en potencia del mismo (alrededor de un 46%^[6]), se puede calcular la influencia de la reducción de la fuerza de arrastre en los retrovisores sobre la reducción del consumo de carburante del vehículo completo. Asimismo, es necesario resaltar el hecho de que este cálculo es tan solo una estimación aproximada de lo que un mecanismo con características similares podría ofrecer si se adaptase su configuración a las regulaciones de circulación pertinentes y, con todo ello, mostrase una reducción de drag similar.

Una vez calculado el ahorro en carburante, se procedió a realizar el cálculo sobre los ahorros anual y total (equivalente a la vida útil del vehículo) que supondría la implantación de cada mecanismo. Para ello, se utilizaron diversos estudios y datos estadísticos públicos sobre los kilómetros anuales medios realizados por un vehículo estándar, así como la duración de su vida útil. Finalmente, se procedió a calcular el valor actual neto de los ingresos pues éstos son obtenidos a medida que el vehículo es utilizado. Para ello, se utilizó un coste medio ponderado del costo de capital o tasa de descuento (WACC) del 4,70%.

De manera equivalente a como se realizó en el caso de costes, se presenta una única tabla de ingresos (Tabla 8). Para mantener la integridad del ejemplo se expone aquella correspondiente al mecanismo de aletas rígidas de longitud $l/d_c = 1$. Asimismo, en este caso las diferentes tablas de ingresos sólo varían en función de la reducción de drag proporcionada por el mecanismo en cuestión. Sin embargo, el resto de tablas de cada mecanismo se puede consultar en el Anexo E-2.

Tabla 8. Análisis de ingresos ^[4,6]

<i>Aletas rígidas $l/d_c = 1$</i>	
Reducción del drag en ensayo (%)	30,76%
Influencia retrovisor/vehículo (%) ^[4]	10,00%
Reducción del drag en vehículo (%)	3,08%
Reducción aerodinámica vehículo (%) ^[6]	1,41%
Reducción de potencia (%)	1,41%

Ahorro de Carburante (%)	1,41%
Precio Carburante (€/L)	1,096
Consumo carburante (L/100km)	5,00
Ahorro por 100km (€/100km)	0,08 €
Km por vehículo al año	19.410,21
Ahorro por año (€)	15,05 €
Km por vehículo en vida	271.743,00
Ahorro en vida (€)	210,71 €
Ahorro	15,05 €
WACC ⁵	4,70%
Ahorro en vida a día de hoy (€)	159,02 €

Al igual que se realizó en el caso de los costes, a continuación se presenta una gráfica (Figura 33) en la que se muestran los ingresos obtenidos tras la implantación de cada uno de los mecanismos. Una de las características a resaltar en esta gráfica es el valor negativo de ciertos mecanismos. La razón de ello es trivial, al no suponer una reducción de la fuerza de arrastre sino un aumento de la misma, el consumo de combustible final del vehículo es mayor de lo habitual y, con ello, el valor actual neto (VAN) de su implantación es negativo. Esto indica la poca conveniencia que supondría llevar a cabo la implantación de esos mecanismos.

⁵ Datos de <http://pages.stern.nyu.edu>



Figura 33. Ingreso total de implantación por mecanismo

Tal y como se puede observar, de nuevo los ingresos más altos se dan para aquellos mecanismo con mayores longitudes de aleta, es decir, los mecanismo correspondientes a aletas rígidas y flexibles de longitud $l/d_c = 1$. Esto es también trivial pues se debe a que son estos mecanismos los que mayor reducción de drag proponen.

5.5.3 Balance neto de la implantación

Una vez calculados los costes y los ingresos que la instalación de cada mecanismo supone, se puede proceder al cálculo del balance neto que la operación supone. De esta manera, se podrá comprobar qué mecanismos infieren en una mejora desde el punto de vista económico y qué otros mecanismos provocan más pérdidas de las habituales. Para la elaboración de dicho balance se procedió a utilizar el ahorro o los ingresos que implicaba el uso de cada mecanismo a lo largo de toda la vida útil del vehículo, ya calculados en la sección anterior, y escalarlos a la flota completa de vehículos que

instalarían la tecnología. Esto da una idea de la cantidad total de dinero ahorrado por parte de los usuarios de los vehículos y, consecuentemente, equivale al monto total que la empresa propietaria de los vehículos podría cobrar a dichos usuarios. Dado que existen muchos otros factores que pueden alterar el precio de un producto en el mercado como puede ser la estética, la demanda, la moda, etc., este es un precio que coincide con el umbral sobre el cual el usuario comenzaría a perder en valores económicos frente al ahorro provocado por reducción de combustible desde el punto de vista aerodinámico.

A continuación se muestra, una tabla en la que se describe la sistemática seguida para el cálculo del balance en cada caso. Una vez más, sólo se muestra la tabla correspondiente a uno de los casos ya que, de otra manera, se perdería agilidad en el análisis. De nuevo, la tabla elegida corresponde al mecanismo por aletas rígidas de longitud $l/d_c = 1$.

Tabla 9. Análisis del beneficio

<i>Análisis de beneficios - Aletas rígidas $l/d_c = 1$</i>	
Coste ahorrado por vehículo	159,02 €
Número de vehículos con la tecnología	40000
Coste total ahorrado	6.360.821,57 €
Beneficio sobre el total	6.041.801,89 €

Al igual que se ha realizado en las secciones anteriores, a continuación se muestra un gráfico en el que se pueden evaluar los datos ofrecidos por cada mecanismo, de manera que se puede llevar a cabo la comparativa acerca de cuál de ellos es aquél que implica un mayor ahorro económico para el consumidor o, desde el punto de vista opuesto, un mayor volumen de ingresos por parte de la empresa que instaló el mecanismo en la flota de vehículos.

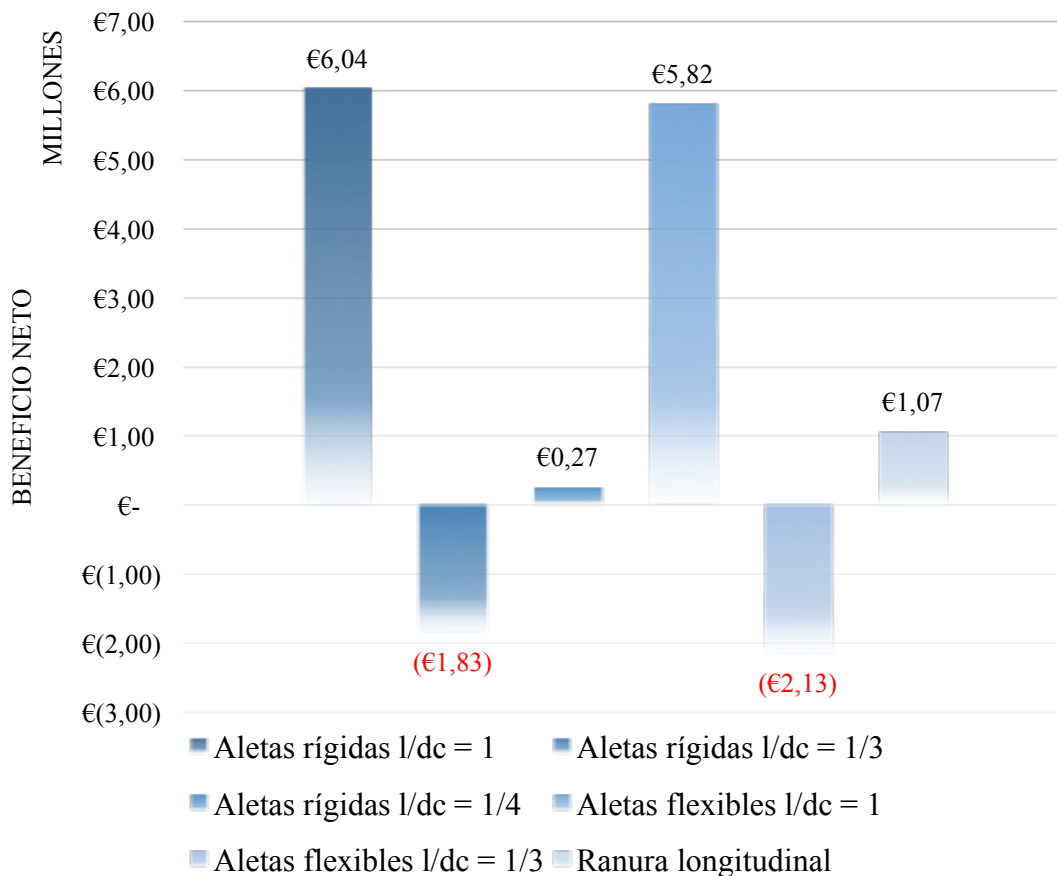


Figura 34. Balance de ingresos y costes por mecanismo

Tal y como puede observarse en la Figura 34, los mecanismos que mejor balance entre ingresos y costes son aquellos correspondientes a aletas de mayor tamaño (esto es, aquellas con $l/d_c = 1$), tanto rígidas como flexibles, ambas dos con beneficios superiores a los 5,5M€ para el conjunto de la flota de 40.000 vehículos.

Al igual que se ha comentado en secciones anteriores, los resultados de los análisis de balance pertinentes al resto de mecanismos ensayados pueden verse al final de este documento, en el Anexo E-3.

A modo de resumen último, la Figura 35 muestra la información descrita a lo largo de las tres secciones. En ella se observa lo que se viene comentando hasta ahora. Una vez evaluados los costes e ingresos que cada mecanismo propone, se puede concluir que el mecanismo pasivo de control del flujo que mejores prestaciones ofrece en lo que a beneficios económicos se refiere es el mecanismo por aletas rígidas de longitud equivalente a $l/d_c = 1$, el cual permite ahorrar más de 6M€ si se instalase en una flota de 40.000 vehículos.

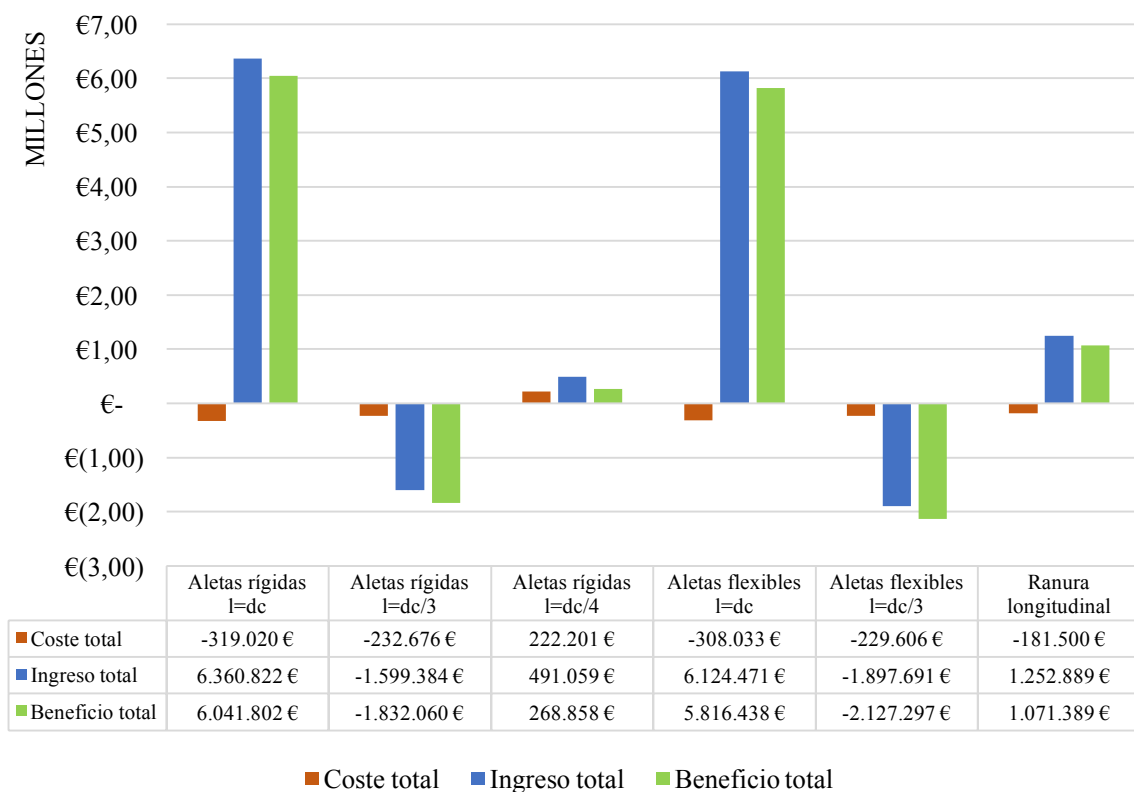


Figura 35. Resumen del análisis económico

Una vez realizado el análisis económico de los diferentes mecanismos ensayados, se llevó a cabo un análisis acerca de las emisiones de CO₂ que la instalación de los diferentes mecanismos supondrían.

5.2 Análisis de emisiones

En esta sección se mostrará el análisis de emisiones que implicaría la instalación de los mecanismos de control ensayados. Dado que este análisis, a diferencia del análisis económico descrito, no depende del material utilizado para el mecanismo ni de la cantidad del mismo, sino sólo del efecto sobre la aerodinámica, tan sólo se evaluará el mecanismo que haya proporcionado un resultado más favorable en lo que a reducción de drag se refiere. De esta manera, se ha evaluado el impacto en las emisiones del mecanismo de control por aletas rígidas de longitud $l/d_c = 1$.

Para llevar a cabo el análisis de emisiones, se evaluaron dos posibilidades. Una de ellas pasa por la evaluación del CO₂ evitado por vehículo anualmente y, consecuentemente, por la flota de 40.000 vehículos; y por otro lado se evaluó el impacto que supondría en las emisiones de CO₂ la implantación de la tecnología seleccionada en toda la flota de vehículos de España. Dado que la tecnología resulta beneficiosa en términos económicos para una flota de 40.000 vehículos, también lo será si se escala esta cifra hasta el total de vehículos que circulan.

De cara a la resolución del primer enfoque, se llevó a cabo un primer estudio sobre las emisiones habituales de un turismo estándar en términos medios en España. Con ello y el ahorro porcentual en carburante gracias a la implantación del mecanismo de control, es posible calcular el ahorro en emisiones por litro de combustible utilizado. Una vez obtenida esta cifra, se escogió el consumo medio de un turismo en España y se procedió al cálculo de emisiones evitadas por kilómetro circulado. De esta manera, es posible hallar la cantidad de emisiones que han sido evitadas a lo largo de un año y, en consecuencia, a lo largo de la vida útil de un vehículo. Escalando esta cifra se obtiene el ahorro de CO₂ total por la flota de vehículos completa. A continuación se muestra una tabla en la que se especifican los términos descritos.

Tabla 10. Evaluación de emisiones de 40.000 vehículos

Media de emisiones (g CO ₂ /L) ⁶	2.506,09
% Ahorro de carburante	1,41%
Ahorro de emisiones por litro (g CO ₂ /L)	35,46
Consumo carburante (L/100km)	5,00
Ahorro de emisiones por km (g CO ₂ /km)	1,77
Km por vehículo al año ⁷	9.928,00
Ahorro anual de emisiones por vehículo (kg CO₂)	17,60
Ahorro anual de la flota de vehículos (Ton CO₂)	704,07
Ahorro en vida de la flota de vehículos (Ton CO₂)	9.857,05

⁶ Datos de <http://motorfull.com>

⁷ Datos de <http://www.heraldo.es>

Si, por otro lado, se asume que no sólo la flota de 40.000 vehículos implanta este mecanismo, sino que todos los vehículos de España la incorporasen y mantuviesen, los datos serían escalados tal y como se muestra en la Tabla 11. Para la elaboración de la misma, se utilizaron datos acerca del consumo en carretera llevado a cabo en España a lo largo del año 2013, publicados por el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (IDAE) en España, perteneciente al Ministerio de Industria .

Tabla 11. Ahorro CO₂ tras escalado nacional

Consumo por transporte en carretera en España en 2013 (ML)	27.328,16
Ahorro de carburante (%)	1,41%
Ahorro por transporte en carretera en España en 2013 (ML)	386,67
Media de emisiones (g CO ₂ /L)	2.506,09
Ahorro por transporte en carretera en España en 2013 (Ton CO₂)	969.030,18

De cara a obtener cierto valor de referencia en lo que al ahorro de emisiones se refiere, se procedió a realizar dos análisis diferentes. En uno de ellos se evalúa el número de personas al que equivale la cifra de CO₂ emitida tanto anualmente como a lo largo del ciclo de vida del producto. El segundo análisis evalúa la cantidad de árboles necesarios para absorber la mencionada cantidad de CO₂ ahorrado. Ambos dos análisis fueron llevados a cabo a partir de las dos posturas o hipótesis mencionadas al comienzo de la presente sección, esto es, asumiendo que los mecanismos son implantados en una única flota de 40.000 vehículos y, por otro lado, asumiendo que todos los vehículos españoles implantasen dicha tecnología y lo mantuviesen durante su ciclo de vida útil.

Para su representación, se muestran las siguientes tablas. En ellas se pueden observar las dos comparaciones realizadas de manera detallada.

Tabla 12. Comparación del CO₂ ahorrado con el número de árboles equivalente

	<i>Flota 40.000 vehículos</i>	<i>España</i>
CO ₂ absorbido por un árbol en un año ⁸	10	10
Equivalente al nº de árboles anual	70.407	96.903.018
Equivalente al nº de árboles en el ciclo de vida del producto	985.698	1.356.642.252

Tabla 13. Comparación del CO₂ ahorrado con el número de personas equivalente

	<i>Flota 40.000 vehículos</i>	<i>España</i>
CO ₂ generado por una persona (Ton CO ₂ /año)	0,38	0,38
Nº de personas abastecidas en un año	1.846	2.541.308
Nº de personas abastecidas en el ciclo de vida del producto	25.844	35.578.312

Tal y como se puede observar en ambas tablas, los resultados obtenidos con este mecanismo de control no son en ningún caso insignificantes.

Una vez realizados los análisis económico y de emisiones, se puede comprobar como la rentabilidad del proyecto quedaría más que aprobada. Sin embargo, tal y como se ha explicado anteriormente, este es sólo un análisis estimado que parte de un mecanismo pasivo en primera fase y que, por tanto, requiere de la transformación pertinente para habilitar su uso como aplicación real.

⁸ Datos de <http://www.naturefund.de>

Capítulo 6

Conclusiones

A lo largo de la presente investigación se han evaluado seis diferentes mecanismos pasivos para el control del flujo alrededor de un cilindro de sección semicircular para, de esta manera, evaluar el comportamiento del fluido y la respuesta de los mecanismos frente a la fuerza de arrastre que el cuerpo experimenta al estar sometido a un flujo constante de velocidad media $U_o \approx 9,5 \text{ ms}^{-1}$. De esta manera, esta investigación podría suponer el comienzo de una serie de investigaciones dedicadas a dar aplicación y servicio a, entre otros, la mejora del comportamiento aerodinámico de los espejos laterales de los vehículos convencionales. Este objetivo tiene un único interés pero puede ser observado desde diversas perspectivas que incrementen el interés de personas y empresas. De esta manera, su objetivo es la reducción de emisiones que, con la reducción de combustible consumido debido a la mejora de la aerodinámica del vehículo, aparece. Sin embargo, esto supone un posible ahorro económico por parte del usuario del vehículo como una posibilidad de aumentar los ingresos por parte de la empresa que implantase dicho mecanismo.

En consecuencia a lo comentado, se llevó a cabo un análisis diversos parámetros del fluido que rodea al cilindro, entre los que destaca la evaluación de la velocidad media del mismo en dirección paralela a la corriente. Con ello, se pudo calcular el valor de la fuerza de arrastre resultante para cada mecanismo de control ensayado y, con dichos valores, poder comenzar la comparación, que es el objetivo a seguir a lo largo del estudio.

Desde el punto de la mecánica de fluidos, se ha podido observar a partir de las diferentes gráficas mostradas que los mecanismos con aletas flexibles no han respondido tal y como se esperaba ante la fuerza ejercida por el fluido al pasar. Es decir, se han comportado de manera enormemente similar a como han respondido las aletas rígidas de plástico acrílico. Existen varias opciones para dar respuesta a estos comportamientos, entre los que destaca el hecho de que su espesor no fuera lo suficientemente pequeño como para ceder ante la fuerza en dirección perpendicular al

movimiento que ejerce el fluido y, con ello, las aletas no ejerciesen correctamente la esperada función de mezclador.

Por otro lado, el mecanismo de control por ranura longitudinal ha proporcionado resultados sumamente interesantes pues demuestran su capacidad, sobretodo, de regularizar el flujo a su paso. Con ello, provoca un comportamiento con características más laminares en la zona inmediatamente posterior al cilindro, a la vez que ayuda a estrechar el perfil de velocidades.

De cara a la reducción del coeficiente aerodinámico y, con él, la fuerza de arrastre que sufre el objeto, el mecanismo de aletas rígidas que mejores prestaciones obtiene es aquél referido a las aletas de mayor longitud, esto es, $l/d_c = 1$, tal y como se observa en la Tabla 6. Esto ocurre tanto para el caso de aletas rígidas como flexibles. En relación a lo comentado, en esta tabla se observa como las aletas flexibles y rígidas del mismo tamaño concluyen en resultados con un parecido significativo (diferiendo en un 1%, aproximadamente). En el caso del mecanismo por ranura, se encuentra como término medio entre los resultados de los mecanismos de aletas con longitudes mayores ($l/d_c = 1$) y menores ($l/d_c = 1/4$), pues los mecanismos por aletas de longitud intermedia ($l/d_c = 1/3$) han arrojado resultados similares pero negativos en lo que a la reducción del coeficiente aerodinámico se refiere. Esto puede estar provocado por, entre otras cosas, el aumento de la estela o efecto que ejercen la longitud de estas aletas en la velocidad media. Este aumento en la longitud del efecto ha proporcionado mayor déficit de velocidad de lo que el caso base generaba y, en consecuencia, el valor de la fuerza de arrastre en estos casos es mayor. Finalmente, el mecanismo por aletas rígidas de longitud menor ($l/d_c = 1/4$) arroja un resultado en el valor del coeficiente de control que tan sólo difiere en un 2,4% respecto del obtenido en el caso base. Esto hace indicar que la longitud de dichas aletas ayuda ligeramente a la regularización del flujo aguas abajo del objeto, sin embargo, su efecto es prácticamente insignificante, por lo que los beneficios esperados de su implantación también lo serán.

Paralelamente, teniendo en cuenta el análisis económico realizado de cada uno de los mecanismos en caso de que éstos fueran implantados muestra que los mecanismos con mejor resultados en la reducción del coeficiente aerodinámico son aquellos que mejores beneficios económicos proponen, aun siendo los que, por otro lado, mayores costes de aprovisionamiento y manipulación implican, tal y como se puede comprobar en la Figura 35. Asimismo, en esta misma figura se observa como estos mecanismos

son aquellos referidos a los mecanismos de aletas rígidas y flexibles de longitud $l/d_c = 1$. Entre ambos, se sobrepone el mecanismo de aletas rígidas dado que, aun incurriendo en un coste mayor de aprovisionamiento y fabricación, este es muy inferior a la diferencia entre los beneficios que ambas dos proporcionan.

Finalmente, si se tiene en cuenta que las emisiones evitadas por cada mecanismo si este fuese implantado están directamente relacionadas con la reducción de la fuerza de arrastre que propone cada mecanismo, se puede concluir que el mecanismo más beneficioso en todos los ámbitos es el mecanismo pasivo de control por aletas rígidas de longitud $l/d_c = 1$. Este mecanismo ofrece una reducción del coeficiente aerodinámico que se traduce en un ahorro de combustible cercano a 159€ (relativo a los precios del momento) y un ahorro en emisiones superior a las 9.850 toneladas de CO₂ a lo largo de la vida útil del vehículo.

Tal y como se ha mencionado en numerosas ocasiones en diversas secciones del documento, esta investigación es tan sólo un primer paso sobre los efectos que un mecanismo de control pasivo en los espejos laterales podría suponer sobre la aerodinámica global del vehículo, siendo, los datos, aproximaciones basadas en los resultados obtenidos durante los ensayos. Resultados que pudieran variar en función de los diferentes ajustes que el mecanismo precisase para su aplicación futura.

Referencias

- [1] Rohatgi, Upendra S. "Methods of reducing vehicle aerodynamic drag." ASME 2012 Summer Heat Transfer Conference. 2012.
- [2] Koike, Masaru, Tsunehisa Nagayoshi, and Naoki Hamamoto. "Research on aerodynamic drag reduction by vortex generators." Mitsubishi Motors Technical Review 16 (2004).
- [3] Ammar, Muhammad, Nik Mu'tasim, and Mat Sahat Idris. "Computational Analysis of an Effect of Aerodynamic Pressure on the Side View Mirror Geometry." (2013): 1-9.
- [4] Mimeau, C., Mortazavi, I., & Cottet, G. H. (2014). "Passive flow control around a semi-circular cylinder using porous coatings". International Journal of Flow Control, 6(1), 43-60.
- [5] Lin, Ning, et al. "Characteristics of wind forces acting on tall buildings." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 93.3 (2005): 217-242.
- [6] Hucho, Wolf-heinich, and Gino Sovran. "Aerodynamics of road vehicles. "Annual review of fluid mechanics 25.1 (1993): 485-537.
- [7] Lien, F. S., E. Yee, and Y. Cheng. "Simulation of mean flow and turbulence over a 2D building array using high-resolution CFD and a distributed drag force approach." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 92.2 (2004): 117-158.
- [8] Bruneau, Charles-Henri, et al. "Coupling active and passive techniques to control the flow past the square back Ahmed body." Computers & Fluids 39.10 (2010): 1875-1892.
- [9] Yajima, Yoshio, and Osamu Sano. "A note on the drag reduction of a circular cylinder due to double rows of holes." Fluid dynamics research 18.4 (1996): 237.
- [10] Kunze, Sebastian, and Christoph Brücker. "Control of vortex shedding on a circular cylinder using self-adaptive hairy-flaps." Comptes Rendus Mécanique 340.1 (2012): 41-56.

- [11] Farhadi, M., K. Sedighi, and E. Fattahi. "Effect of a splitter plate on flow over a semi-circular cylinder." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 224.3 (2010): 321-330.
- [12] Thiria, B., O. Cadot, and J-F. Beaudoin. "Passive drag control of a blunt trailing edge cylinder." *Journal of Fluids and Structures* 25.5 (2009): 766-776.
- [13] Parezanović, Vladimir, and Olivier Cadot. "Experimental sensitivity analysis of the global properties of a two-dimensional turbulent wake." *Journal of Fluid Mechanics* 693 (2012): 115-149.
- [14] Kim, Jin Tae. "Three-dimensional particle tracking velocimetry for turbulence applications." (2015).
- [15] Tobin, N., H. Zhu, and L. P. Chamorro. "Spectral behaviour of the turbulence-driven power fluctuations of wind turbines." *Journal of Turbulence* 16.9 (2015): 832-846.
- [16] Tobin, Nicolas, Ali M. Hamed, and Leonardo P. Chamorro. "An Experimental Study on the Effects of Winglets on the Wake and Performance of a Model Wind Turbine." *Energies* 8.10 (2015): 11955-11972.
- [17] Adrian, R. J., C. D. Meinhart, and C. D. Tomkins. "Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer." *Journal of Fluid Mechanics* 422 (2000): 1-54.
- [18] Pastoor, Mark, et al. "Feedback shear layer control for bluff body drag reduction." *Journal of fluid mechanics* 608 (2008): 161-196.
- [19] Miller, W. S., et al. "Recent development in aluminium alloys for the automotive industry." *Materials Science and Engineering: A* 280.1 (2000): 37-49.
- [20] Cole, G. S., and A. M. Sherman. "Lightweight materials for automotive applications." *Materials characterization* 35.1 (1995): 3-9.
- [21] "Plastic Material Guide." EPlastic. N.p., n.d. Web. 16 Nov. 2015. <<http://www.eplastics.com/>>.
- [22] Camocardi, Mauricio E. Control de flujo sobre la estela cercana de perfiles aerodinámicos mediante la implementación de mini-flaps Gurney. Diss. Facultad de Ingeniería, 2012.

- [23] Culley, Dennis. "Active Flow Control Laboratory." Intelligent Control and Autonomy Branch Facilities. NASA Glenn Research Center, 29 Feb. 2008.
- [24] Schlichting, H. "Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, New York, 1979."
- [25] EPA, April. Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2013. EPA 430-R-11-005, 2015.
- [26] Lajos, Tamás. "Basics of vehicle aerodynamics." Budapest University of Technology and Economics Department of Fluid Mechanics. Kättesaadav, (15.05. 2015) (2002).
- [27] Olsson, Martin. "Designing and Optimizing Side-View Mirrors.", Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics, Sweden (2011)
- [28] The History of Invention. New York, NY: Facts on File, 1987. Print.
- [29] Bruneau, Charles-Henri, and Iraj Mortazavi. "Passive control of the flow around a square cylinder using porous media." *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 46.4 (2004): 415-433.
- [30] Kwon, Kiyoung, and Haecheon Choi. "Control of laminar vortex shedding behind a circular cylinder using splitter plates." *Physics of Fluids (1994-present)* 8.2 (1996): 479-486.
- [31] Roumeas, Mathieu, Patrick Gilliéron, and Azeddine Kourta. "Analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry." *Computers & Fluids* 38.1 (2009): 60-70.
- [32] Gad-el-Hak, Mohamad. "Flow control." *Applied mechanics reviews* 42.10 (1989): 261-293.
- [33] White, Frank M. "Fluid mechanics. 5th." Boston: McGraw-Hill Book Company (2003).
- [34] Flatt, Joseph. "The history of boundary layer control research in the United States of America." *Boundary Layer and Flow Control* 1 (1961): 122-143.
- [35] Gad-el-Hak, M. "Flow Control: Passive, active and reactive flow management, 2000."
- [36] Gad-el-Hak, Mohamed. "Modern developments in flow control." *Applied Mechanics Reviews* 49.7 (1996): 365-379.

- [37] Fisher, Michael, James Kolb, and Suzanne Cole. "Enhancing future automotive safety with plastics." The 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Paper. 2004.
- [38] Szeteiová, Katarína. "Automotive materials: plastics in automotive markets today." Institute of Production Technologies, Machine Technologies and Materials, Faculty of Material Science and Technology in Trnava, Slovak University of Technology Bratislava (2010).
- [39] ATKearney. "Plastics: The Future for Automakers and Chemical Companies - Artículo - A.T. Kearney | España - A.T. Kearney." Plastics: The Future for Automakers and Chemical Companies. N.p., n.d. Web. 09 June 2016.
- [40] ASM Handbook Committee. "Metals Handbook: Vol. 2, Properties and selection—nonferrous alloys and pure metals." American Society for Metals, Metals Park, OH (1978).
- [41] Handbook, ASM Metals. "Howard E." Boyer and Timothy L. Gall, Eds., American Society for Metals, Materials Park, OH (1985).
- [42] Holt, John M., et al. Structural Alloys Handbook. 1996 ed. /. West Lafayette, Ind.: CINDAS/Purdue University, 1997. Print.
- [43] "Materials." CIDRA Precision Services, LLC. N.p., n.d. Web. 17 Apr. 2016. <<http://www.cidraprecisionservices.com/life-sciences-materials.html>>.
- [44] S.a., Material Diesel. "RETROVISORES." CASALS.
- [45] Prasad, Ajay K. "Particle image velocimetry." Current science-bangalore-79.1 (2000): 51-60.
- [46] Schlichting, H. "Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, New York, 1979." Company, New York, 1979.

Anexos

Anexo A: Velocidad media en dirección paralela al flujo libre

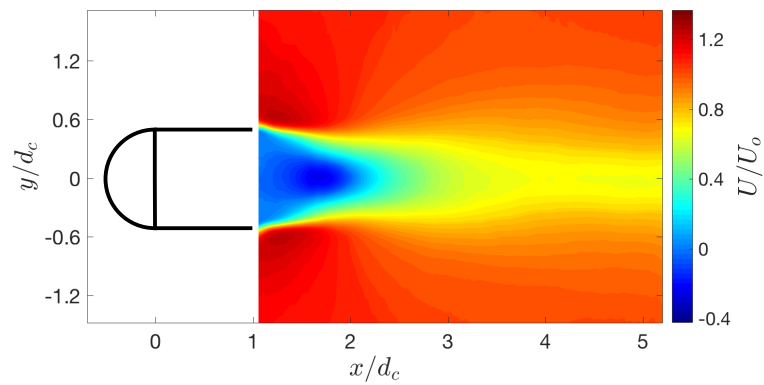


Figura 36. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre para aletas rígidas de $l/d_c = 1$

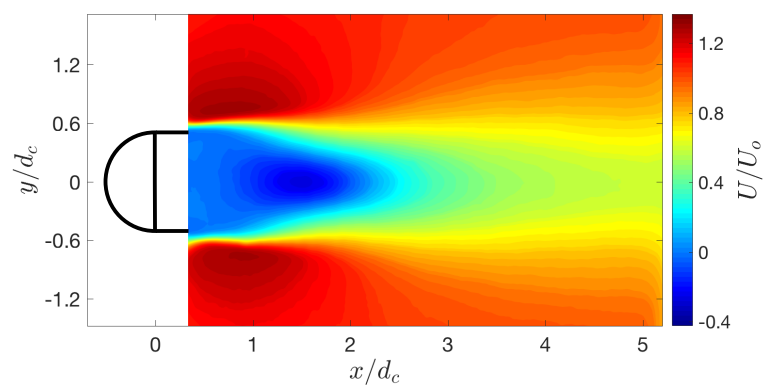


Figura 37. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre para aletas rígidas de $l/d_c = 1/3$

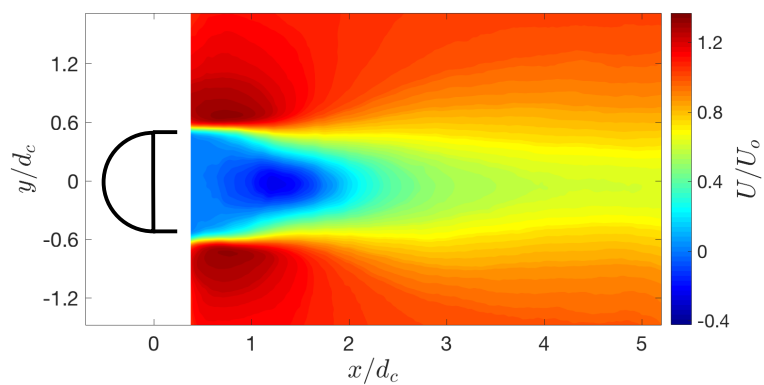


Figura 38. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre para aletas rígidas de $l/d_c = 1/4$

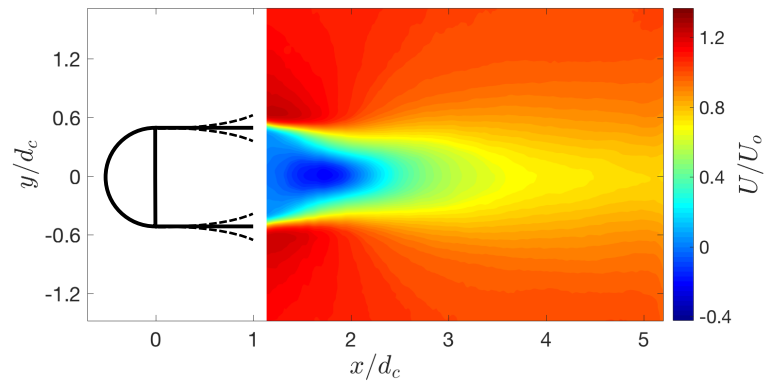


Figura 39. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre para aletas flexibles de $l/dc = 1$

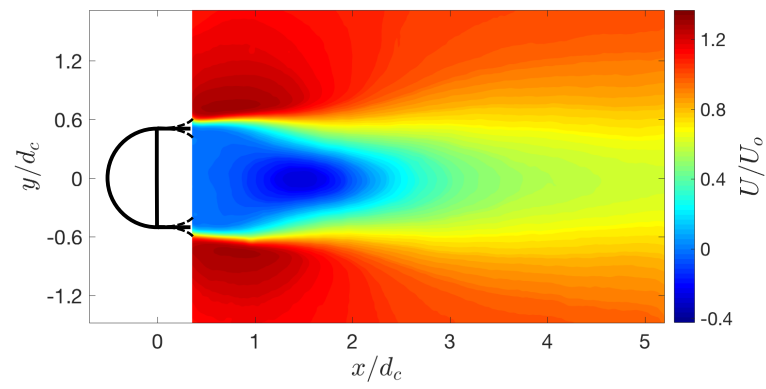


Figura 40. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre para aletas flexibles de $l/dc = 1/3$

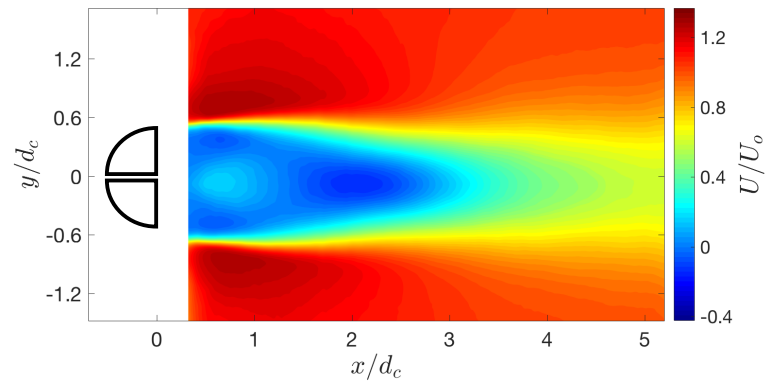


Figura 41. Velocidad media en dirección paralela al flujo libre para ranura longitudinal

Anexo B: Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre

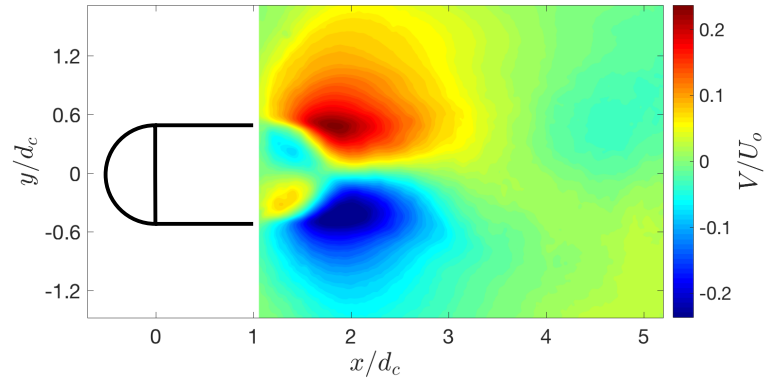


Figura 42. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre para aletas rígidas de $l/d_c = 1$

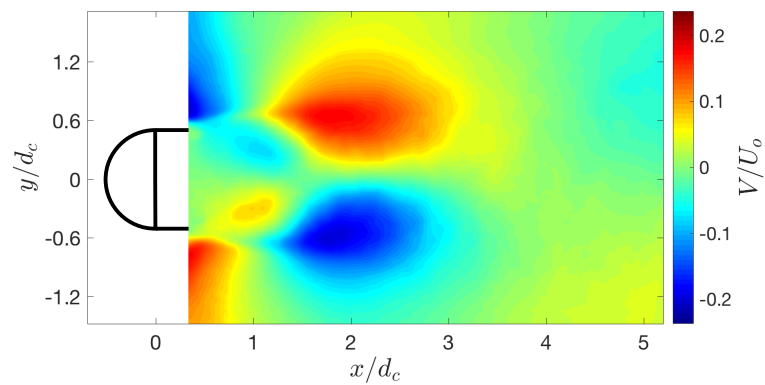


Figura 43. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre para aletas rígidas de $l/d_c = 1/3$

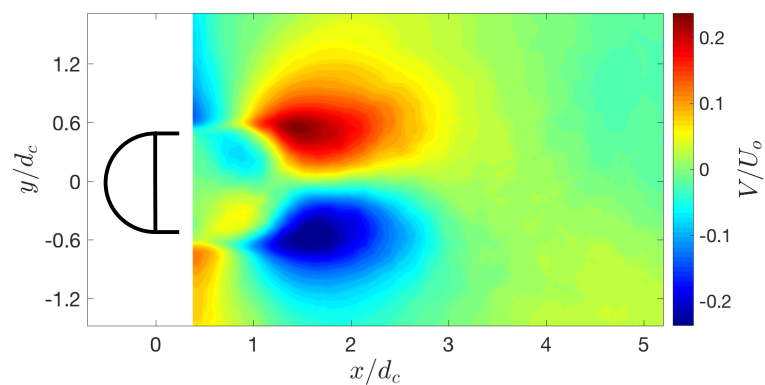


Figura 44. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre para rígidas de $l/d_c = 1/4$

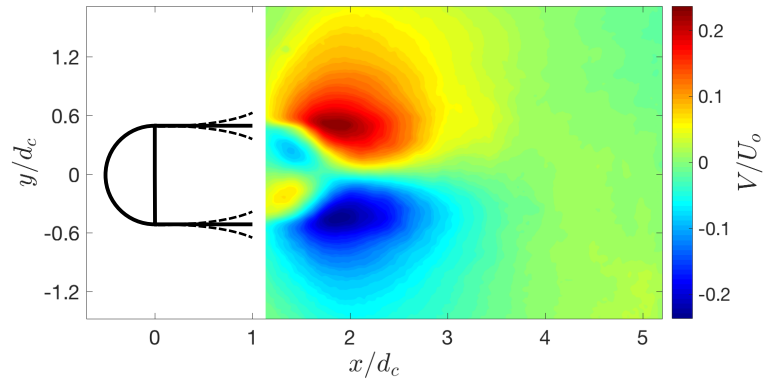


Figura 45. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre para aletas flexibles de $l/d_c = 1$

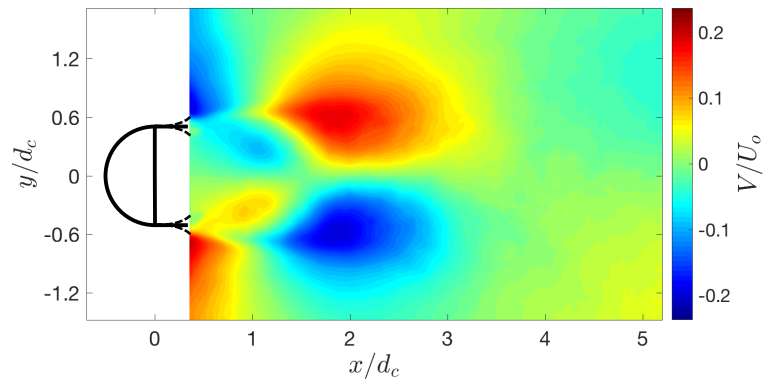


Figura 46. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre para aletas flexibles de $l/d_c = 1/3$

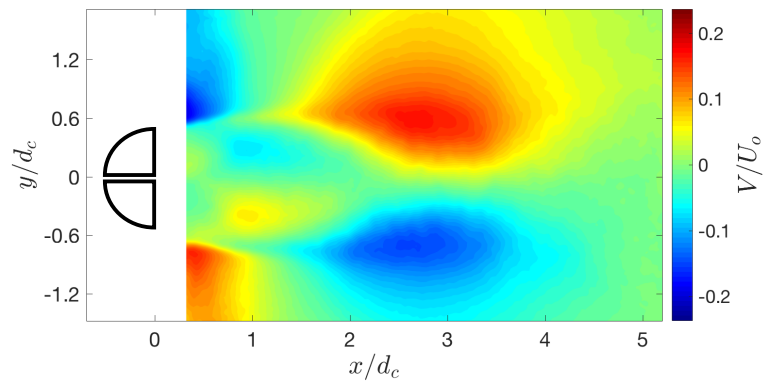


Figura 47. Velocidad media en dirección perpendicular al flujo libre para ranura longitudinal

Anexo C: Energía cinética turbulenta

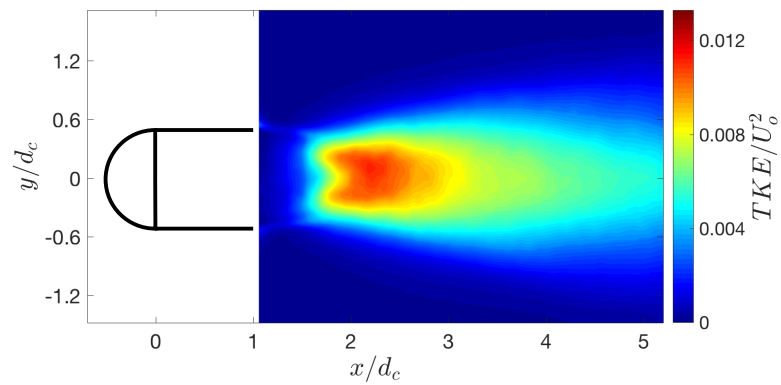


Figura 48. Energía cinética turbulenta para aletas rígidas de $l/dc = 1$

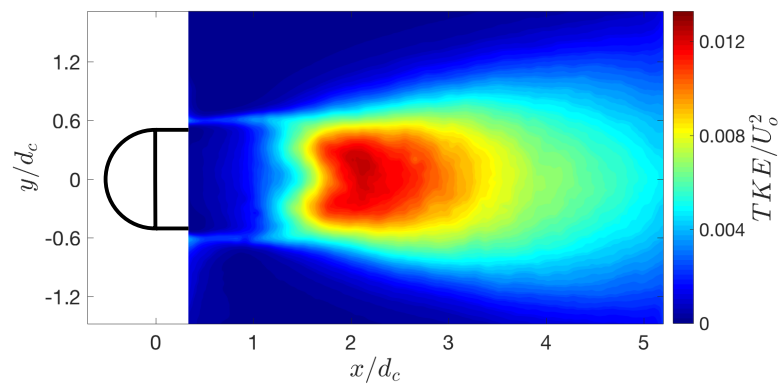


Figura 49. Energía cinética turbulenta para aletas rígidas de $l/dc = 1/3$

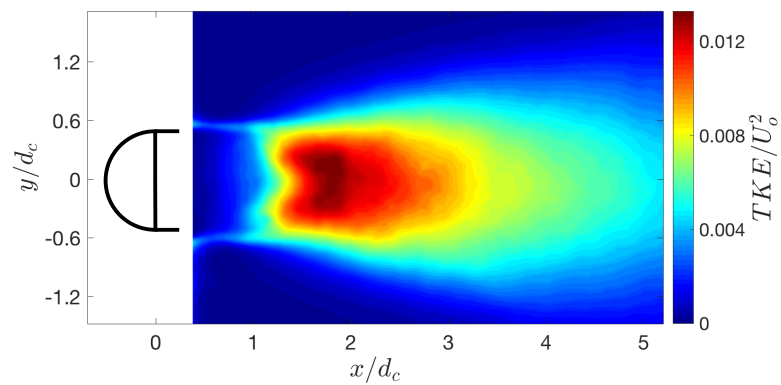


Figura 50. Energía cinética turbulenta para rígidas de $l/dc = 1/4$

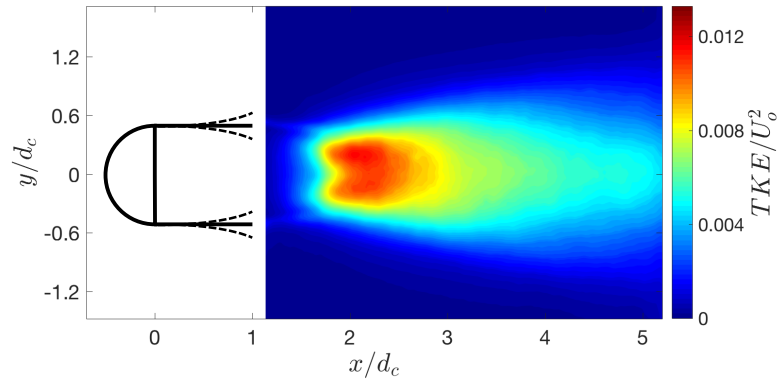


Figura 51. Energía cinética turbulenta para aletas flexibles de $l/d_c = 1$

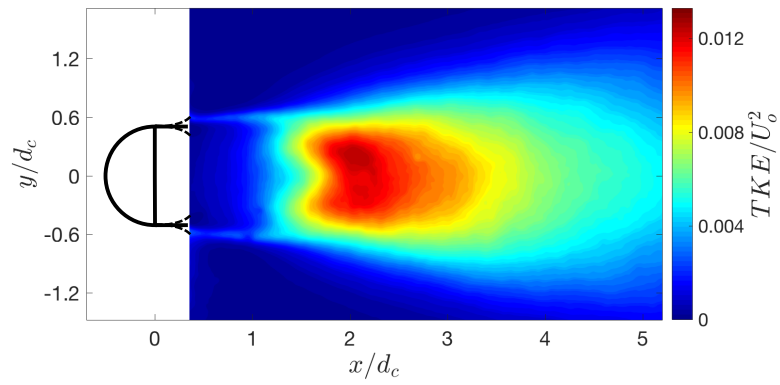


Figura 52. Energía cinética turbulenta para aletas flexibles de $l/d_c = 1/3$

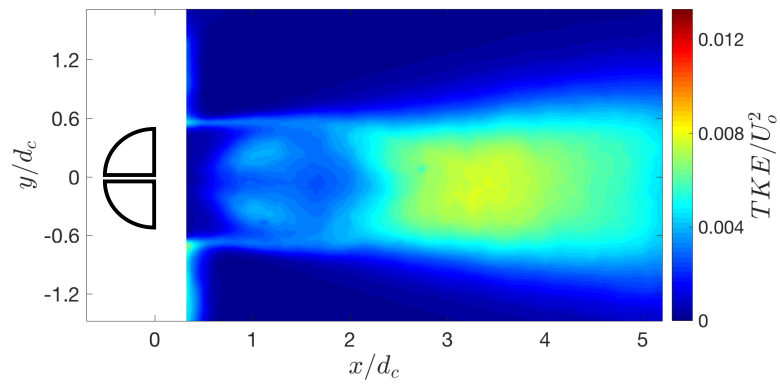


Figura 53. Energía cinética turbulenta para ranura longitudinal

Anexo D: Esfuerzos turbulentos

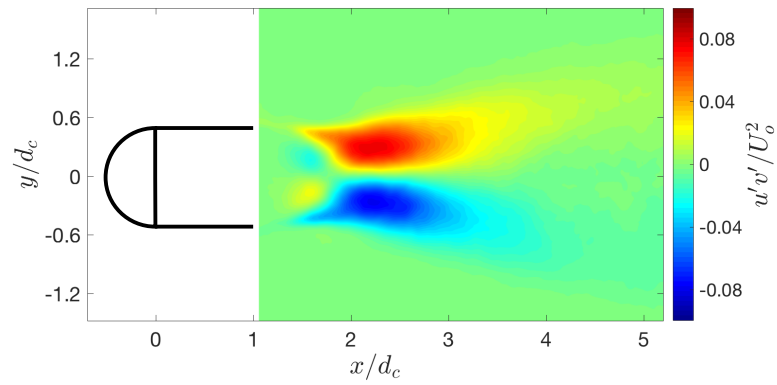


Figura 54. Esfuerzos turbulentos para aletas rígidas de $l/d_c = 1$

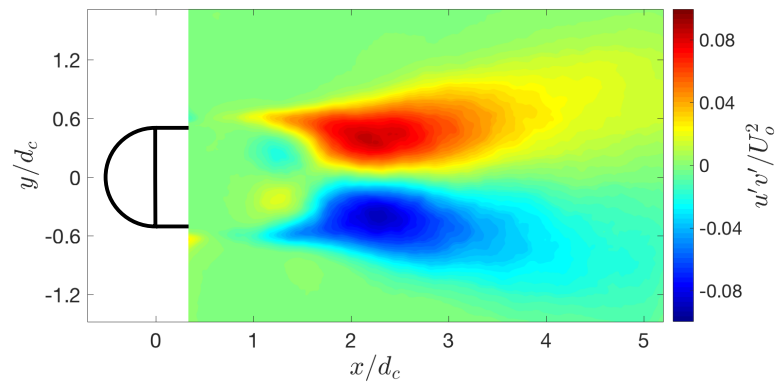


Figura 55. Esfuerzos turbulentos para aletas rígidas de $l/d_c = 1/3$

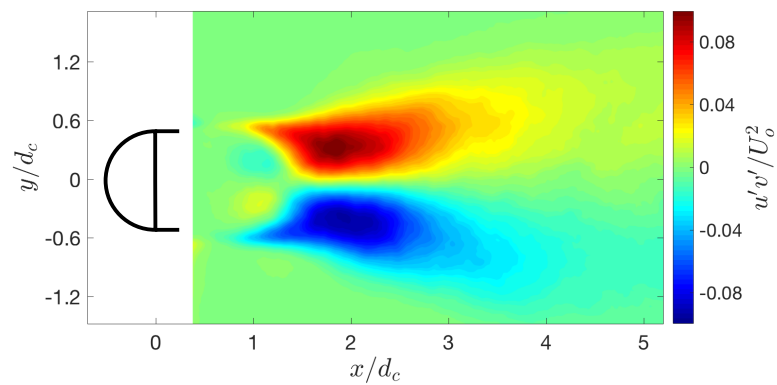


Figura 56. Esfuerzos turbulentos para rígidas de $l/d_c = 1/4$

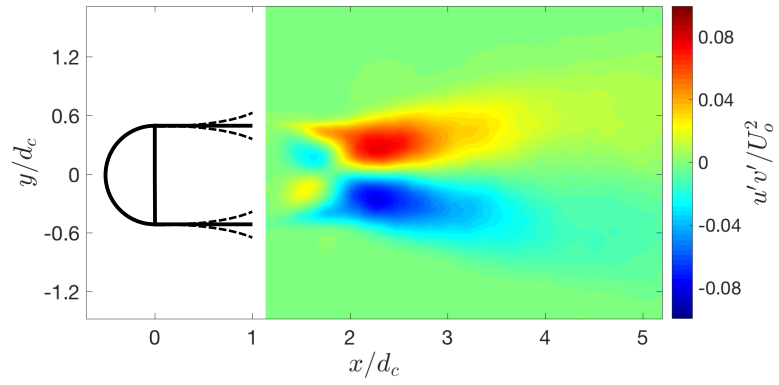


Figura 57. Esfuerzos turbulentos para aletas flexibles de $l/d_c = 1$

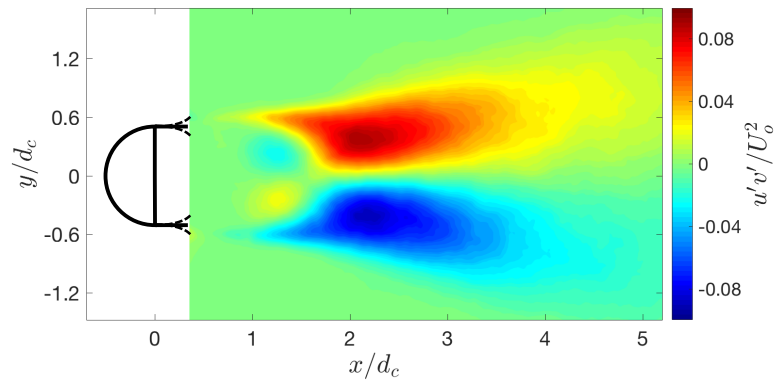


Figura 58 Esfuerzos turbulentos para aletas flexibles de $l/d_c = 1/3$

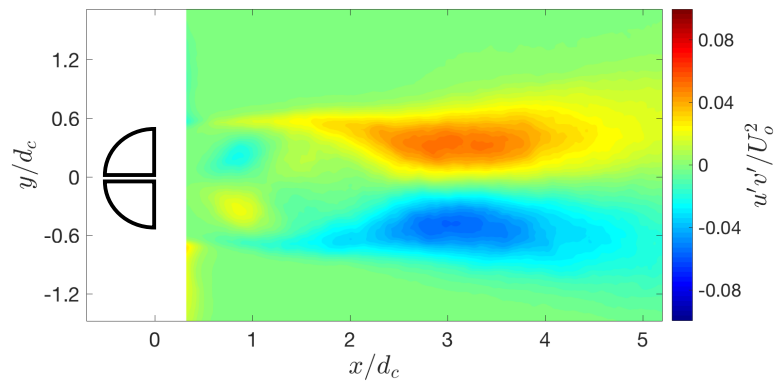


Figura 59. Esfuerzos turbulentos para ranura longitudinal

Anexo E: Análisis económico

E-1: Costes de implantación

Tabla 14. Coste total de implantación para aletas rígidas de $x/d_c = 1$

<i>Aletas rígidas $l/d_c = 1$</i>	
Número de vehículos con la tecnología	40.000,00
Número de aletas necesarias	160.000,00
Número de aletas por placa	72,00
Número de placas necesarias	2.223,00
Precio unitario placa	52,61 €
Distribución	880,00 €
Coste extra del material	116.952,03 €
Pegamento para 10 aletas (g)	28,35
Pegamento para el total de aletas (kg)	453,59
Número de botes de pegamento (1,5kg)	303,00
Coste unitario del bote	26,62 €
Coste total del pegamento	8.065,86 €
Coste de la maquinaria de corte	165.000,00 €
Incremento del 10%	29.001,79 €
Coste total	319.019,68 €

Tabla 15. Coste total de implantación para aletas rígidas de $x/d_c = 1/3$

<i>Aletas rígidas $l/d_c = 1/3$</i>	
Número de vehículos con la tecnología	40.000,00
Número de aletas necesarias	160.000,00
Número de aletas por placa	219,00
Número de placas necesarias	731,00
Precio unitario placa	52,61 €
Distribución	880,00 €
Coste extra del material	38.457,91 €
Pegamento para 10 aletas (g)	28,35
Pegamento para el total de aletas (kg)	453,59
Número de botes de pegamento (1,5kg)	303,00
Coste unitario del bote	26,62 €
Coste total del pegamento	8.065,86 €
Coste de la maquinaria de corte	165.000,00 €
Incremento del 10%	21.152,38 €
Coste total	232.676,15 €

Tabla 16. Coste total de implantación para aletas rígidas de $x/d_c = 1/4$

<i>Aletas rígidas $l/d_c = 1/4$</i>	
Número de vehículos con la tecnología	40.000,00
Número de aletas necesarias	160.000,00
Número de aletas por placa	291,00
Número de placas necesarias	550,00
Precio unitario placa	52,61 €
Distribución	880,00 €
Coste extra del material	28.935,50 €
Pegamento para 10 aletas (g)	28,35
Pegamento para el total de aletas (kg)	453,59
Número de botes de pegamento (1,5kg)	303,00
Coste unitario del bote	26,62 €
Coste total del pegamento	8.065,86 €
Coste de la maquinaria de corte	165.000,00 €
Incremento del 10%	20.200,14 €
Coste total	222.201,50 €

Tabla 17. Coste total de implantación para aletas flexibles de $x/d_c = 1$

<i>Aletas flexibles $l/d_c = 1$</i>	
Número de vehículos con la tecnología	40.000,00
Número de aletas necesarias	160.000,00
Número de aletas por placa	54,00
Número de placas necesarias	2.963,00
Precio unitario placa	36,10 €
Distribución	35.556,00 €
Coste extra del material	106.964,30 €
Pegamento para 10 aletas (g)	28,35
Pegamento para el total de aletas (kg)	453,59
Número de botes de pegamento (1,5kg)	303,00
Coste unitario del bote	26,62 €
Coste total del pegamento	8.065,86 €
Coste de la maquinaria de corte	165.000,00 €
Incremento del 10%	28.003,02 €
Coste total	308.033,18 €

Tabla 18. Coste total de implantación para aletas flexibles de $x/d_c = 1/3$

<i>Aletas flexibles $l/d_c = 1/3$</i>	
Número de vehículos con la tecnología	40.000,00
Número de aletas necesarias	160.000,00
Número de aletas por placa	162,00
Número de placas necesarias	988,00
Precio unitario placa	36,10 €
Distribución	11.856,00 €
Coste extra del material	35.666,80 €
Pegamento para 10 aletas (g)	28,35
Pegamento para el total de aletas (kg)	453,59
Número de botes de pegamento (1,5kg)	303,00
Coste unitario del bote	26,62 €
Coste total del pegamento	8.065,86 €
Coste de la maquinaria de corte	165.000,00 €
Incremento del 10%	20.873,27 €
Coste total	229.605,93 €

Tabla 19. Coste total de implantación para ranura longitudinal

<i>Ranura longitudinal</i>	
Número de vehículos con la tecnología	40.000,00
Número de ranuras necesarias	40.000,00
Número de ranuras por placa	0,00
Número de ranuras necesarias	40.000,00
Precio unitario ranura	- €
Distribución	- €
Coste extra del material	- €
Pegamento para 10 aletas (g)	0,00
Pegamento para el total de aletas (kg)	0,00
Número de botes de pegamento (1,5kg)	0,00
Coste unitario del bote	26,62 €
Coste total del pegamento	- €
Coste de la maquinaria de corte	165.000,00 €
Incremento del 10%	16.500,00 €
Coste total	181.500,00 €

E-2: Ingresos de implantación y uso

Tabla 20. Coste total de implantación para aletas rígidas de $x/d_c = 1$

<i>Aletas rígidas $l/d_c = 1$</i>	
Reducción del drag en ensayo (%)	30,76%
Influencia retrovisor/vehículo (%) ^[4]	10,00%
Reducción del drag en vehículo (%)	3,08%
Reducción aerodinámica vehículo (%) ^[6]	1,41%
Reducción de potencia (%)	1,41%
Ahorro de Carburante (%)	1,41%
Precio Carburante (€/L)	1,096
Consumo carburante (L/100km)	5,00
Ahorro por 100km (€/100km)	0,08 €
Km por vehículo al año	19.410,21
Ahorro por año (€)	15,05 €
Km por vehículo en vida	271.743,00
Ahorro en vida (€)	210,71 €
Ahorro	15,05 €
WACC ^[7]	4,70%
Ahorro en vida a día de hoy (€)	159,02 €

Tabla 21. Coste total de implantación para aletas rígidas de $x/d_c = 1/3$

<i>Aletas rígidas $l/d_c = 1/3$</i>	
Reducción del drag en ensayo (%)	-7,73%
Influencia retrovisor/vehículo (%) ^[4]	10,00%
Reducción del drag en vehículo (%)	-0,77%
Reducción aerodinámica vehículo (%) ^[6]	-0,36%
Reducción de potencia (%)	-0,36%
Ahorro de Carburante (%)	-0,36%
Precio Carburante (€/L)	1,096
Consumo carburante (L/100km)	5,00
Ahorro por 100km (€/100km)	-0,02 €
Km por vehículo al año	19.410,21
Ahorro por año (€)	-3,78 €
Km por vehículo en vida	271.743,00
Ahorro en vida (€)	-52,98 €
Ahorro	-3,78 €
WACC ^[7]	4,70%
Ahorro en vida a día de hoy (€)	-39,98 €

Tabla 22. Coste total de implantación para aletas rígidas de $x/d_c = 1/4$

<i>Aletas rígidas $l/d_c = 1/4$</i>	
Reducción del drag en ensayo (%)	2,37%
Influencia retrovisor/vehículo (%) ^[4]	10,00%
Reducción del drag en vehículo (%)	0,24%
Reducción aerodinámica vehículo (%) ^[6]	0,11%
Reducción de potencia (%)	0,11%
Ahorro de Carburante (%)	0,11%
Precio Carburante (€/L)	1,096
Consumo carburante (L/100km)	5,00
Ahorro por 100km (€/100km)	0,01 €
Km por vehículo al año	19.410,21
Ahorro por año (€)	1,16 €
Km por vehículo en vida	271.743,00
Ahorro en vida (€)	16,27 €
Ahorro	1,16 €
WACC ^[7]	4,70%
Ahorro en vida a día de hoy (€)	12,28 €

Tabla 23. Coste total de implantación para aletas flexibles de $x/d_c = 1$

<i>Aletas flexibles $l/d_c = 1$</i>	
Reducción del drag en ensayo (%)	29,62%
Influencia retrovisor/vehículo (%) ^[4]	10,00%
Reducción del drag en vehículo (%)	2,96%
Reducción aerodinámica vehículo (%) ^[6]	1,36%
Reducción de potencia (%)	1,36%
Ahorro de Carburante (%)	1,36%
Precio Carburante (€/L)	1,096
Consumo carburante (L/100km)	5,00
Ahorro por 100km (€/100km)	0,07 €
Km por vehículo al año	19.410,21
Ahorro por año (€)	14,49 €
Km por vehículo en vida	271.743,00
Ahorro en vida (€)	202,88 €
Ahorro	14,49 €
WACC ^[7]	4,70%
Ahorro en vida a día de hoy (€)	153,11 €

Tabla 24. Coste total de implantación para aletas flexibles de $x/d_c = 1/3$

<i>Aletas flexibles $l/d_c = 1/3$</i>	
Reducción del drag en ensayo (%)	-9,18%
Influencia retrovisor/vehículo (%) ^[4]	10,00%
Reducción del drag en vehículo (%)	-0,92%
Reducción aerodinámica vehículo (%) ^[6]	-0,42%
Reducción de potencia (%)	-0,42%
Ahorro de Carburante (%)	-0,42%
Precio Carburante (€/L)	1,096
Consumo carburante (L/100km)	5,00
Ahorro por 100km (€/100km)	-0,02 €
Km por vehículo al año	19.410,21
Ahorro por año (€)	-4,49 €
Km por vehículo en vida	271.743,00
Ahorro en vida (€)	-62,86 €
Ahorro	-4,49 €
WACC ^[7]	4,70%
Ahorro en vida a día de hoy (€)	-47,44 €

Tabla 25. Coste total de implantación para ranura longitudinal

<i>Ranura longitudinal</i>	
Reducción del drag en ensayo (%)	6,06%
Influencia retrovisor/vehículo (%) ^[4]	10,00%
Reducción del drag en vehículo (%)	0,61%
Reducción aerodinámica vehículo (%) ^[6]	0,28%
Reducción de potencia (%)	0,28%
Ahorro de Carburante (%)	0,28%
Precio Carburante (€/L)	1,096
Consumo carburante (L/100km)	5,00
Ahorro por 100km (€/100km)	0,02 €
Km por vehículo al año	19.410,21
Ahorro por año (€)	2,96 €
Km por vehículo en vida	271.743,00
Ahorro en vida (€)	41,50 €
Ahorro	2,96 €
WACC ^[77]	4,70%
Ahorro en vida a día de hoy (€)	31,32 €

E-3: Balance de la implantación

Tabla 26. Balance para el mecanismo de aletas rígidas de $l/d_c = 1$

<i>Aletas rígidas $l/d_c = 1$</i>	
Coste ahorrado por vehículo	159,02 €
Número de vehículos con la tecnología	40000
Coste total ahorrado	6.360.821,57 €
<i>Beneficio sobre el total</i>	<i>6.041.801,89 €</i>

Tabla 27. Balance para el mecanismo de aletas rígidas de $l/d_c = 1/3$

<i>Aletas rígidas $l/d_c = 1/3$</i>	
Coste ahorrado por vehículo	-39,98 €
Número de vehículos con la tecnología	40000
Coste total ahorrado	-1.599.384,07 €
<i>Beneficio sobre el total</i>	<i>-1.832.060,21 €</i>

Tabla 28. Balance para el mecanismo de aletas rígidas de $l/d_c = 1/4$

<i>Aletas rígidas $l/d_c = 1/4$</i>	
Coste ahorrado por vehículo	12,28 €
Número de vehículos con la tecnología	40000
Coste total ahorrado	491.059,10 €
<i>Beneficio sobre el total</i>	<i>268.857,60 €</i>

Tabla 29. Balance para el mecanismo de aletas flexibles de $l/d_c = 1$

<i>Aletas flexibles $l/d_c = 1$</i>	
Coste ahorrado por vehículo	153,11 €
Número de vehículos con la tecnología	40000
Coste total ahorrado	6.124.470,70 €
<i>Beneficio sobre el total</i>	<i>5.816.437,52 €</i>

Tabla 30. Balance para el mecanismo de aletas flexibles de $l/d_c = 1/3$

<i>Aletas flexibles $l/d_c = 1/3$</i>	
Coste ahorrado por vehículo	-47,44 €
Número de vehículos con la tecnología	40000
Coste total ahorrado	-1.897.690,99 €
<i>Beneficio sobre el total</i>	<i>-2.127.296,92 €</i>

Tabla 31. Balance para el mecanismo de ranura longitudinal

<i>Ranura longitudinal</i>	
Coste ahorrado por vehículo	31,32 €
Número de vehículos con la tecnología	40000
Coste total ahorrado	1.252.889,10 €
<i>Beneficio sobre el total</i>	<i>1.071.389,10 €</i>