



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Diseño de caja de geometría  
variable para semirremolque.

Nicolás Benjamín Alonso Villarejo.

Jesús Fuentelsaz Gallego.

Grado de Ingeniería Mecánica.

Escuela de Ingeniería y Arquitectura.  
Universidad de Zaragoza.

Septiembre 2015



## Agradecimientos.

---

Una vez terminado este Trabajo Fin de Grado me gustaría agradecer a todas las personas que de forma directa o indirecta han contribuido en este proyecto.

En primer lugar agradecer al Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza, departamento en el que he desarrollado mi trabajo. En especial al director del proyecto, Jesús Fuentelsaz, por su confianza, colaboración y buena disposición desde el momento que le propuse mi idea para realizar este trabajo.

Agradecer también a todos los transportistas que compartieron conmigo su valioso tiempo otorgándome una práctica visión de los semirremolques y del transporte por carretera que de otra forma me hubiera sido muy difícil adquirir.

Mención especial merecen Carlos Martín, y Javier del Mazo, que me abrieron las puertas de sus empresas de forma desinteresada, ofreciéndome información y consejos muy valiosos para la elaboración de este trabajo.

Por último, agradecer a mi familia y a Lara por el apoyo mostrado en este trabajo y durante los años de realización del Grado de Ingeniería Mecánica.





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D<sup>a</sup>. Nicolás Benjamín Alonso Villarejo,

con nº de DNI 73024049-S en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
\_\_\_\_\_ (Título del Trabajo)

Diseño de caja de geometría variable para semirremolque

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 21/09/2015

Fdo: Nicolás Benjamín Alonso Villarejo





## RESUMEN.

En el 74,67% de los transportes de mercancías que se realizan por carretera no se emplea la totalidad del volumen de carga útil del semirremolque. A continuación **se plantea una caja para semirremolque que aprovecha el espacio vacío que queda en el interior del semirremolque para variar su forma y adoptar una geometría aerodinámicamente más eficiente**. El semirremolque adecúa su estructura a la mercancía que transporta, ofreciendo importantes ventajas en versatilidad y eficiencia frente a los semirremolques convencionales.

En la memoria de este documento se presenta, en primer lugar, un análisis aerodinámico. Se estudia la relación entre la forma del conjunto cabina-semirremolque y su resistencia aerodinámica. Para ello se han empleado dos tipos de cabinas y tres de semirremolques. Los resultados muestran que el **margen de mejora del coeficiente de penetración aerodinámico de los camiones actuales alcanza el 34,9%**.

De los semirremolques analizados, el que se considera más adecuado es aquél que porta la caja de geometría variable en altura. Este tipo de caja puede adoptar distintas configuraciones, por lo que se **cuantifica** el efecto que tienen dichas configuraciones en términos de **ahorro de consumo de combustible** y **emisión de gases de efecto invernadero** de los camiones que los remolcan.

Conocidos los beneficios económicos y ecológicos que acompañan a la caja de geometría variable para semirremolque, se procede con el **diseño de concepto**, planteando todas las piezas necesarias para la elaboración de la referida estructura. Además se explica detalladamente la función que tiene cada componente en el mecanismo que permite modificar la geometría del semirremolque, así como su principio de funcionamiento.

En la parte final de la memoria se exponen tanto las conclusiones obtenidas como las futuras líneas de trabajo.



# Índice general.

---

<b>Capítulo 1. Introducción.</b>	<b>14</b>
1.1 Objetivo.	16
1.2 Alcance.	16
1.3 Marco del trabajo.	16
<b>Capítulo 2. Metodología de trabajo.</b>	<b>17</b>
<b>Capítulo 3. Análisis aerodinámico.</b>	<b>18</b>
3.1 Estimación del coeficiente de penetración aerodinámico.	19
3.1.1 Método de White.	19
3.1.2 Aplicación del Método de White a las distintas configuraciones estudiadas.	19
3.1.3 Resultados.	20
3.2 Estudio de la variación del consumo de combustible en función de las distintas configuraciones empleadas.	21
3.2.1 Cálculo del consumo de combustible.	21
3.2.2 Cuantificación del ahorro de combustible en función de la configuración empleada.	22
3.2.3 Análisis de los resultados aerodinámicos.	<b>26</b>
<b>Capítulo 4. Diseño del semirremolque.</b>	<b>27</b>
4.1 Estructura del semirremolque.	27
4.1.1 Plataforma base.	28
4.1.2 Postes telescópicos.	28
4.1.3 Cartolas.	29
4.1.4 Articulaciones.	30
4.1.5 Travesaños del techo.	31
4.1.6 Largueros del techo extensibles.	31
4.1.7 Tambor para el techo.	32
4.1.8 Puerta.	33
4.2 Funcionamiento del mecanismo.	34
4.2.1 Principio de funcionamiento de la puerta tipo persiana.	34

4.2.2 Principio de funcionamiento del mecanismo que permite variar la forma del semirremolque.....	35
4.2.2 Procedimiento de uso.....	36
<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>37</b>
<b>Futuras líneas de trabajo.....</b>	<b>39</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>40</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>42</b>
APÉNDICE A. TABLAS EMPÍRICAS DE WHITE.....	43
APÉNDICE C. VISTAS COMPLETAS DEL SEMIRREMOLQUE.....	46
APÉNDICE D. ENCUESTA.....	55

# Índice de tablas.

---

<b>Tabla 1.</b> Resultados de reducción porcentual de $C_x$ .....	20
<b>Tabla 2.</b> Resultados de $C_x$ obtenidos mediante el Método de White. ....	21
<b>Tabla 3.</b> Características independientes al vehículo. ....	23
<b>Tabla 4.</b> Características y resultados de la configuración A.....	23
<b>Tabla 5.</b> Características y resultados de la configuración B.....	23
<b>Tabla 6.</b> Características y resultados de la configuración C. ....	23
<b>Tabla 7.</b> Características y resultados de la configuración B+C. ....	24
<b>Tabla 8.</b> Características y resultados de la configuración A'. ....	24
<b>Tabla 9.</b> Características y resultados de la configuración B'. ....	24
<b>Tabla 10.</b> Características y resultados de la configuración C'. ....	24
<b>Tabla 11.</b> Características y resultados de la configuración B'+C'. ....	25
<b>Tabla 12.</b> Características y resultados de la configuración sin carga. ....	25
<b>Tabla 13.</b> Características y resultados de la configuración sin carga A.....	25
<b>Tabla 14.</b> Características y resultados de la configuración sin carga A'. ....	25
<b>Tabla 15.</b> Ahorro de consumo de combustible según la configuración empleada.....	26

# Índice de figuras.

<i>Ilustración 1. Figura 1-izda, camión año 1930. Figura 1-dcha, camión actual (2015).</i>	14
<i>Ilustración 2. Figura 2- izda, Peugeot 201, año 1930. Figura 2- dcha, Tesla S, coche actual (2015).</i>	14
<i>Ilustración 3. Líneas de flujo de semirremolque “teardrop”, imagen de DON-BUR....</i>	15
<i>Ilustración 4. íneas de flujo de semirremolque convencional, imagen de DON-BUR..</i>	15
<i>Ilustración 5. Figura 5- izda, y 5- dcha, caja de geometría variable para semirremolque. Las figuras muestran dos configuraciones distintas.</i>	17
<i>Ilustración 6. Figura 6- izda, (Concept S, de MAN). Figura 6- dcha, kit aerodinámico Mercedes (deflectores traseros, separadores cabina-semirremolque, protección de bajos).</i>	18
<i>Ilustración 7. Figura 7- izda, cabeza tractora Scania. Figura 7- dcha, cabeza tractora futurista.</i>	19
<i>Ilustración 8. Figura 8- izda, semirremolque convencional (tipo A). Figura 8- dcha, semirremolque que permite la variación de la altura del techo (tipo B).</i>	20
<i>Ilustración 9. Semirremolque que permite la regulación en altura, y anchura en su parte final. (tipo C).</i>	20
<i>Ilustración 10. Semirremolque de semilonas.</i>	27
<i>Ilustración 11. Base del semirremolque.</i>	28
<i>Ilustración 12. Figura 12- izda, postes telescópicos del semirremolque. Figura 12- dcha, base para postes telescópicos.</i>	29
<i>Ilustración 13. Figura 13-izda, cartola. Figura 13-dcha, cartolas colocadas en el semirremolque.</i>	30
<i>Ilustración 14. Figura 14- izda, soporte de la articulación. Figura 14- dcha, pasador de la articulación..</i>	30
<i>Ilustración 15. Figura 15- izda, bisagra de la articulación. Figura 15- dcha, articulación completa.</i>	30
<i>Ilustración 16. Figura 16- izda, travesaño de la articulación. Figura 16- dcha, ubicación de los travesaños en el semirremolque.</i>	31
<i>Ilustración 17. <math>L_t &lt; L_t'</math></i>	31
<i>Ilustración 18. Figura 18- izda, perfil del larguero. Figura 18- dcha, larguero.</i>	32
<i>Ilustración 19. Figura 19- izda, ubicación de los largueros en el semirremolque. Figura 19- dcha, soporte de los largueros.</i>	32
<i>Ilustración 20. Figura 20- izda, tambor. Figura 20- centro, soporte del tambor. Figura 20- dcha, engancho lona-tambor.</i>	33
<i>Ilustración 21. Figura 22-izda, puerta tipo persiana cerrada. Figura 22-dcha, puerta tipo persiana abierta.</i>	34
<i>Ilustración 22. Esquema de funcionamiento de la puerta</i>	35
<i>Ilustración 23. Semirremolque de geometría variable, configuración 100% volumen de carga.</i>	35
<i>Ilustración 24. Semirremolque de geometría variable, configuración para optimizar la eficiencia aerodinámica.</i>	36



# Capítulo 1. Introducción.

*“Un ladrillo es la forma menos aerodinámica que quepa imaginar, y por eso necesitamos mejorar la forma de los camiones que circulan por nuestras carreteras. Esos cambios harán más limpio y seguro el transporte por carretera. Permitirán reducir la factura de carburante de los transportistas y darán a los fabricantes europeos una ventaja de salida en el diseño del camión del futuro, un camión más ecológico concebido para el mercado mundial.”*

*Siim Kallas, Vicepresidente de la Comisión responsable del transporte de la Unión Europea. (Bruselas, abril 2013)*

Especialmente en los últimos años y debido en gran parte al incremento del precio del petróleo, la industria automotriz ha enfatizado en la necesidad de disminuir el consumo de combustible de sus vehículos. Para conseguirlo, se trabaja en mejorar los niveles de eficiencia de los motores, en minimizar las pérdidas en la transmisión, la resistencia a la rodadura y en la resistencia aerodinámica. En este último aspecto, la mayoría de los vehículos han sufrido una gran transformación mejorando significativamente sus valores del coeficiente de penetración aerodinámico. Sin embargo, la evolución de los camiones de carretera es mucho menos significativa, y los modelos actuales tienen un diseño muy similar al de los años 30.



*Ilustración 1. Figura 1- izda, camión año 1930. [www.hankstruckpictures.com](http://www.hankstruckpictures.com).  
Figura 1- dcha, camión actual (2015). [www.ncctr.net](http://www.ncctr.net)*



*Ilustración 2. Figura 2- izda, Peugeot 201, año 1930. [www.mascoche.net](http://www.mascoche.net).  
Figura 2- dcha, Tesla S, coche actual (2015). [www.elecarda.com](http://www.elecarda.com)*

La directiva 96/53/CE de julio de 1996 establece las dimensiones máximas permitidas para los semirremolques. La prioridad a la hora de diseñar un semirremolque es maximizar el espacio de

## Diseño de caja de geometría variable para semirremolque.

carga útil. Debido a ello, la gran mayoría de los semirremolques que circulan por nuestras carreteras tienen forma de paralelepípedo. Sin embargo, dicho diseño es muy ineficiente en términos aerodinámicos, lo que repercute negativamente en el consumo de combustible y en la emisión de partículas contaminantes de los camiones que los remolcan.

La aerodinámica está cobrando un papel cada vez más relevante en el sistema de transporte por carretera. Fruto de ello son, por ejemplo, los innovadores diseños de cabezas tractoras como la *Concept S*, de MAN, *WALMART Concept Truck* o *The Spitzer*, de Luigi Colani. Pero la investigación aerodinámica no se limita a la mejora de la eficiencia en la cabina, sino que existen también distintos estudios que aseguran que el consumo de combustible se puede reducir considerablemente rediseñando la forma de los semirremolques. “*A new approach for the Reduction of Aerodynamic Drag of Long-Distance Transportation Vehicles*”, estudio llevado a cabo por Mario Hirz y Severin Stadler de “*Graz University Technology*” defienden que con una reducción del 3,2% del espacio de carga se ahorra un 6,5% del consumo de combustible. Estas cifras han hecho que ya se empiecen a fabricar y comercializar en Inglaterra semirremolques con una geometría aerodinámica más eficiente (empresa DON-BUR).



*Ilustración 3. Líneas de flujo de semirremolque “teardrop”, imagen de DON-BUR*



*Ilustración 4. Líneas de flujo de semirremolque convencional, imagen de DON-BUR.*

Sin embargo, a pesar de que este tipo de semirremolques se llevan comercializando desde el año 2006, ninguna otra compañía ha desarrollado modelos similares. Son pocos los transportistas que están dispuestos a renunciar a parte del espacio de carga útil, por pequeño que esta sea.

Tras estudiar detenidamente el caso, la solución que considero más adecuada es el **diseño de una caja de geometría variable para semirremolque**, capaz de maximizar su espacio de carga útil hasta los límites legales, y en aquellos casos en los que la carga lo permita, adoptar una configuración más eficiente aerodinámicamente.

Un estudio estadístico desarrollado para este Trabajo Fin de Grado (*de ahora en adelante TFG*), concluye que **sólo en el 25,3% de los transportes se realizan con el semirremolque absolutamente lleno**, en el 17,33% de los transportes queda sin ocupar 1/3 del volumen de carga útil del vehículo, el 5,67% lo hace con el camión prácticamente vacío, y en el 51,67% de los casos queda espacio libre en la parte superior del final del semirremolque.

## 1.1 Objetivo.

Los semirremolques que circulan diariamente por nuestras carreteras buscan maximizar el espacio de carga, lo que repercute en una geometría muy ineficiente aerodinámicamente. **El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es dotar a dicho semirremolque de una geometría variable capaz de adoptar distintas configuraciones en función de las condiciones de carga.** Dichas configuraciones optimizan la eficiencia aerodinámica, lo que nos permite abordar problemas de consumo de combustible y emisión de partículas contaminantes.

## 1.2 Alcance.

El TFG que se propone en este documento alcanza:

- Estudio del estado del arte.
- Estudio aerodinámico, ahorro de consumo y reducción de partículas contaminantes.
- Diseño de concepto de la caja de geometría variable para el semirremolque y cálculo de sus elementos auxiliares.
- Valoración del potencial del producto, ventajas e inconvenientes.

## 1.3 Marco del trabajo.

Hasta mediados del siglo XVIII, los seres humanos vivimos en una sociedad agraria y rural, en la que existía un equilibrio entre lo que necesitábamos y los recursos de los que disponía nuestro planeta. El avance tecnológico y la invención de la máquina de vapor dieron paso a la Revolución Industrial, y nuestra sociedad agraria y rural evolucionó, en algunos lugares antes que en otros, hacia otra industrial y urbana. Desde entonces hemos transformado por completo el lugar en el que vivimos. Hemos contaminado sus tierras, aguas y aires, rompiendo el equilibrio que mantuvimos durante siglos entre lo que La Tierra puede ofrecernos y lo que los seres humanos le exigimos. Revertir esta situación debe ser tarea de todos, pero creo que nosotros, los ingenieros, debemos adoptar un compromiso aún mayor que el resto de la sociedad.

El incremento del precio del petróleo, ligado a la crisis que sufrimos desde el año 2008, han provocado que el margen de beneficio del negocio del transporte por carretera disminuya drásticamente. La feroz competencia entre las distintas compañías y transportistas autónomos en la pugna por conseguir una mercancía que transportar hace que mínimas diferencias entre ofertas determinen al distribuidor de una determinada carga. La supervivencia de cualquier empresa en el mercado del transporte por carretera hoy día depende de poder realizar transportes de la forma más eficiente posible. La sociedad consumista en la que vivimos, las expectativas de crecimiento demográfico que se esperan en algunas partes del mundo y la globalización sugieren que el volumen de mercancías que se moverán en el futuro será incluso mayor.

Por ello, en los últimos años se ha estado investigando en soluciones técnicas abordadas desde distintas perspectivas que buscan una reducción del consumo de combustible. Se están desarrollando productos innovadores que contribuyen a un transporte de mercancías por carretera más económico y limpio. El transporte por carretera es uno de los principales focos de emisión de dióxido de carbono (*de aquí en adelante* CO<sub>2</sub>), y aproximadamente un tercio de estas emisiones las generan los vehículos comerciales, especialmente los camiones.

**La necesidad de construir un transporte por carretera más barato y ecológico aumentan a la par que lo hace el precio del petróleo y la contaminación de nuestra atmósfera.**

## Capítulo 2.

# Metodología de trabajo.

La metodología que se ha seguido en este TFG ha sido la siguiente:

En primer lugar se ha realizado un **análisis del estado del arte**. Para ello, y como se muestra en la bibliografía, se han consultado distintas fuentes. Además se ha contactado con personal especializado en el sector. *Carlos Martín*, director de operaciones de *LeciTrailer S.A.*, y *Javier del Mazo*, jefe de producto de *Schmitz Cargobull Ibérica S.A.*, me abrieron las puertas de sus respectivas empresas y colaboraron en la documentación y el diseño. Con un perfil menos técnico pero con una visión más práctica, *30 camioneros* me ofrecieron su valioso tiempo y compartieron sus opiniones conmigo.

En la memoria de este trabajo se presenta un **análisis aerodinámico**, en el que se cuantifica la ganancia en la eficiencia aerodinámica en función de la configuración del semirremolque. Su estudio se ha llevado a cabo a través del *Método de White* [1]. A continuación, se han relacionado los resultados con el **ahorro de consumo de combustible** y la **emisión de gases de efecto invernadero**, empleando para ello *hojas de cálculo Excel*.

Posteriormente se presenta el **diseño de la caja de geometría variable para semirremolque**, así como de los elementos auxiliares que deberán instalarse en el semirremolque para el correcto funcionamiento de la caja. Se han propuesto numerosos bocetos, sopesando las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos hasta alcanzar el diseño final. Para realizar el modelado del diseño se ha solicitado una licencia de estudiante al programa *PTC Creo Parametric (ProEngineer)* [2].

Por último, se exponen las **conclusiones** del estudio realizado, analizando las **ventajas e inconvenientes** que tiene el diseño del semirremolque propuesto.



*Ilustración 5. Figura 5- izda, y 5- dcha, caja de geometría variable para semirremolque. Las figuras muestran dos configuraciones distintas.*

[1] El Método de White permite estimar el coeficiente de penetración aerodinámico.

[2] PTC Creo Parametric es un paquete CAD que permite el diseño en 3D.

## Capítulo 3.

# Análisis aerodinámico.

La viabilidad de la caja de geometría variable para semirremolque que se propone en este Trabajo Fin de Grado depende en gran medida de los resultados de reducción de consumo de combustible. Por tanto, es imprescindible cuantificar la mejora aerodinámica y relacionarla con la reducción de consumo y de emisión de partículas contaminantes.

De entre todas las zonas de los vehículos de transporte por carretera en las que se genera resistencia aerodinámica, hay cuatro de ellas que destacan sobre las demás. La parte frontal de la cabina del camión, los bajos del vehículo, el espacio comprendido entre la cabina del camión y el semirremolque, y la parte final del mismo.



Ilustración 6. Figura 6- izda, (Concept S, de MAN). [www.cochesfuturistas.com](http://www.cochesfuturistas.com).  
Figura 6- dcha, kit aerodinámico Mercedes (deflectores traseros, separadores cabina-semirremolque, protección de bajos). [www.camiónactualidad.es](http://www.camiónactualidad.es)

El estudio de este capítulo se centra en reducir las turbulencias y la depresión que se produce en la parte posterior de un camión en circulación, a través de distintas propuestas en cuanto a la geometría del semirremolque, con el fin de mejorar la eficiencia del mismo.

En el estudio “*A new approach for the Reduction of Aerodynamic Drag of Long-Distance Transportation Vehicles*”, aseguran que un 40% del combustible de un camión se emplea en vencer la resistencia aerodinámica, y que rediseñando la parte de la cola del semirremolque podemos mejorar entre un 7% y un 28% el coeficiente de penetración aerodinámica, dependiendo de la geometría del vehículo. Según DON-BUR, el 50% del consumo de combustible de un camión convencional en carretera a velocidades próximas a los 55 mph se invierte en vencer la resistencia aerodinámica, y con sus “*teardrop trailers*” se puede lograr una reducción de consumo de combustible del 10%.

Sin embargo, cada país cuenta con una legislación distinta en cuanto a dimensiones o velocidades máximas. Por tanto, en este capítulo se busca cuantificar la influencia que tiene la geometría del semirremolque en el ahorro de combustible, ajustándonos a la reglamentación española.

A continuación se explica cómo se ha aproximado el coeficiente de penetración aerodinámico (de aquí en adelante  $C_x$ ) del conjunto cabeza tractora–semirremolque. Por último, se emplean los valores obtenidos para calcular el consumo de combustible en función de parámetros tales como la geometría del semirremolque o la carga del mismo.

## 3.1 Estimación del coeficiente de penetración aerodinámica.

Para realizar la estimación del  $C_x$  se empleará el Método de White. Dicho método proporciona una aproximación con un margen de error de entre un 7% y un 10% para camiones.

### 3.1.1 Método de White.

El Método de White permite realizar una estimación del coeficiente de penetración aerodinámica de un vehículo según su geometría externa. Los estudios realizados por White defienden que dicho coeficiente se adapta a la siguiente expresión empírica:

$$C_x = a_0 + \sum_{I=A}^1 X_i * a_i \approx a_0 + a_i \sum_{I=A}^1 X_i = 0.16 + 0.0095 \sum_{I=A}^1 X_i$$

Para determinar los valores de ( $X_i$ ) se utilizan las tablas empíricas de White (anexos). Se compara la geometría del vehículo sometido al estudio con las diferentes configuraciones que se proponen en dichas tablas.

### 3.1.2 Aplicación del Método de White a las distintas configuraciones estudiadas.

Posteriormente se estiman los  $C_x$  de distintas configuraciones de camiones, relacionando la geometría del vehículo con los coeficientes tabulados. Las distintas configuraciones que se van a evaluar están constituidas por la síntesis de las siguientes opciones:

- Cabezas tractoras. Se analizan dos tipos: actuales o futuristas:



*Ilustración 7. Figura 7- izda, cabeza tractora Scania. [www.scania.es](http://www.scania.es)  
Figura 7- dcha, cabeza tractora futurista. [www.transportemundial.es](http://www.transportemundial.es)*

- Semirremolque. Se analizan tres tipos: convencional (**tipo A**), caída progresiva del techo, (**tipo B**), caída progresiva del techo y estrechamiento en su parte final (**tipo C**). Las medidas y geometrías de los semirremolques analizados corresponden a semirremolques de tres ejes.



Ilustración 8. Figura 8- izda, semirremolque convencional (tipo A). [www.infotransport.es](http://www.infotransport.es)  
Figura 8- dcha, semirremolque que permite la variación de la altura del techo (tipo B). Imagen de Mario Hirz and Severin Stadler study.

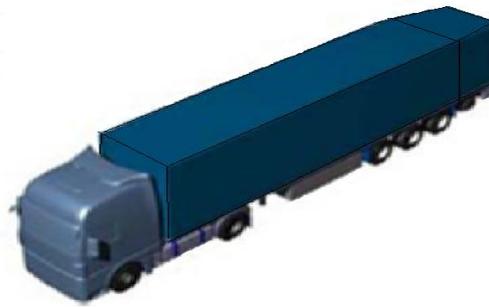


Ilustración 9. Semirremolque que permite la regulación en altura, y anchura en su parte final. (tipo C). Imagen de Mario Hirz and Severin Stadler study.

### 3.1.3 Resultados.

A continuación se muestran los resultados de  $C_x$  obtenidos al aplicar el Método de White a distintas configuraciones, así como la reducción del coeficiente de penetración aerodinámica obtenida en términos porcentuales.

	A.	B.	C.	D.	E.	F.	G.	H.	I.	$C_x'$	Reducción $C_x$ total[%]
Cabeza actual, caja tipo A	4	3	2	2	5	1	5	2	5	0,436	0,000
Cabeza actual, caja tipo B	4	3	2	2	5	1	1	2	5	0,398	8,726
Cabeza actual, caja tipo C	4	3	1	2	5	1	1	2	5	0,388	10,907
Cabeza futuro, caja tipo A	2	2	2	1	3	1	5	1	1	0,331	23,995
Cabeza futuro, caja tipo B	2	2	2	1	3	1	1	1	1	0,293	32,721
Cabeza futuro, caja tipo C	2	2	1	1	3	1	1	1	1	0,284	34,902

Tabla 1. Resultados de reducción porcentual de  $C_x$ .

El  $C_x$  de un camión generalmente oscila entre los siguientes valores:  $0,55 \leq C_x \leq 0,75$ . Los valores obtenidos a través del Método de White son menores. Para minimizar el error, se toman en consideración los valores de reducciones porcentuales obtenidos, y se aplican dichas reducciones a el valor real medio ( $C_x = 0,65$ ). Además se muestra de forma independiente el efecto en la reducción de  $C_x$  debido al cambio de cabeza tractora y al cambio de semirremolque, para apreciar la influencia de cada uno de estos factores sobre el  $C_x$  de manera aislada.

Los nuevos valores de  $C_x$  obtenidos a partir del Método de White son:

	Reducción Cx	Reducción Cx factor caja	Cx
Cx, cabeza actual, caja tipo A	0,00	0,00	0,650
Cx, cabeza actual, caja tipo B	8,73	8,73	0,593
Cx, cabeza actual, caja tipo C	10,91	10,91	0,579
Cx, cabeza futuro, caja tipo A	24,00	0,00	0,494
Cx, cabeza futuro, caja tipo B	32,72	11,48	0,437
Cx, cabeza futuro, caja tipo C	34,90	14,35	0,423

Tabla 2. Resultados de Cx obtenidos mediante el Método de White.

Los resultados muestran una reducción del **8,73%** al emplear el diseño de **caja tipo B** (caída progresiva de la altura del semirremolque), y del **10,91%** al usar el diseño de **caja tipo C** (reducción de anchura y altura en la parte final del semirremolque). Los datos obtenidos al emplear la **cabeza tractora** que se espera para el **futuro** muestran una influencia incluso mayor, del **11,48%** y **14,35%** respectivamente. Al mejorar la aerodinámica de la cabeza tractora un 24%, la parte final del semirremolque se convierte en el principal foco de resistencia aerodinámica. Eso explica que las mejoras propuestas en esta zona tengan una reducción del Cx más significativa.

Los resultados obtenidos muestran que la configuración que incluye el semirremolque capaz de variar su anchura y altura en su parte final se beneficia de un menor Cx. Por lo tanto, si el objetivo es optimizar el diseño aerodinámico del conjunto, la **caja tipo C es la más adecuada**. Sin embargo, este modelo acarrea una gran cantidad de problemas en su diseño, fabricación y mantenimiento, principalmente en la zona de la puerta. Por lo tanto, se ha descartado al análisis de este tipo de semirremolque. A pesar de que sus resultados aerodinámicos sean muy positivos, **no se considera en este TFG**, que se centrará en el diseño de una caja de geometría variable en altura para un semirremolque.

## 3.2 Estudio de la variación del consumo de combustible en función de las distintas configuraciones empleadas.

El combustible que emplea cualquier vehículo se invierte en vencer la inercia del propio vehículo y las distintas resistencias que se presentan cuando éste está en movimiento. Los factores que se oponen a la marcha del vehículo son:

- La resistencia aerodinámica; Se define como:  $F_{aero} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_x A_f V^2$ . A velocidades bajas este factor no tiene gran importancia, sin embargo, a las velocidades a las que circulan los camiones por carretera este factor cobra una gran relevancia.
- La resistencia a la rodadura; Se define como:  $F_{rolling} = \mu_r M g \cos(\alpha)$ . La resistencia a la rodadura depende de las características del neumático, tipo de suelo sobre el que se avanza, presión de inflado, velocidad, temperatura... y de la reacción normal que genera la superficie contra los neumáticos.
- La resistencia debido a la pendiente; Las pendientes positivas disparan el consumo de combustible. Se define como:  $F_{slope} = M g \sin(\alpha)$ .

### 3.2.1 Cálculo del consumo de combustible.

Al variar la geometría del semirremolque podemos modificar dos factores que influyen en la resistencia aerodinámica. El **área frontal** del vehículo y el **coeficiente de penetración**

**aerodinámico.** Los cálculos que se muestran a continuación son válidos cuando el vehículo ya ha vencido su propia inercia y ha adoptado la velocidad de crucero por carretera. Los factores que inciden en el consumo de combustible, pueden clasificarse entre características propias y ajenas al vehículo. Entre los parámetros que inciden en el consumo de combustible y que son ajenos al vehículo se encuentran:

- Densidad del aire:  $\rho_{air} = 1,2 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
- Poder calorífico inferior del diesel:  $PCI_{diesel} = 43.500 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$
- Densidad diesel:  $\rho_{diesel} = 832 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$
- Magnitud de la pendiente:  $\alpha = 0$  [%].

Entre los parámetros propios del vehículo se encuentran:

- Eficiencia del motor:  $\zeta_{motor} = 0,4$
- Coeficiente de penetración aerodinámico:  $Cx$ .
- MMA del vehículo:  $m$  [kg].
- Área frontal del vehículo:  $A_f$  [m<sup>2</sup>].
- Velocidad:  $V$   $\left[ \frac{km}{h} \right]$ .
- Coeficiente de fricción de rodadura:  $\mu_r = 0,012$

El consumo de combustible se ha calculado en función de las siguientes ecuaciones:

- Fuel consumption  $\left[ \frac{L}{100km} \right] = \dot{m}_f \left[ \frac{L}{m} \right] * \frac{100.000[m]}{100[km]}$
  - $\dot{m}_f \left[ \frac{L}{m} \right] = \frac{Rt [kN]}{\zeta_{engine} * PCI_{diesel} \left[ \frac{kJ}{L} \right]}$
  - $Rt [kN] = \sum R_i = R_{rolling} [kN] + R_{slope} [kN] + R_{aerodynamic} [kN]$
- $$\left\{ \begin{array}{l} R_{rolling} [kN] = m [kg] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] * \cos(\alpha) * \mu_r \\ R_{slope} [kN] = m [kg] * g \left[ \frac{m}{s^2} \right] * \text{sen}(\alpha) \\ R_{aerodynamic} [kN] = \frac{1}{2} \rho_{air} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] * Cx * A_f [m^2] * V^2 \left[ \frac{m^2}{s^2} \right] \end{array} \right.$$
- $PCI_{diesel} \left[ \frac{kJ}{L} \right] = PCI_{diesel} \left[ \frac{kJ}{kg} \right] * \rho_{diesel} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$

### 3.2.2 Cuantificación del ahorro de combustible en función de la configuración empleada.

El límite de velocidad en España para camiones es de 90 km/h en autovías y autopistas. Para poder comparar este estudio con otras fuentes externas, la velocidad tomada para realizar el estudio es de 88 km/h ( 55mph), que es la que se considera velocidad media europea. La masa en orden de marcha y la carga del vehículo suman 35 toneladas. Las características independientes al vehículo serán constantes durante todos los ensayos. Son las siguientes:

	External characteristics
$\alpha$ [%]	0
dair[Kg/m <sup>3</sup> ]	1,2
PCI diesel [KJ/kg]	43.500
$\rho$ diesel [kg/m <sup>3</sup> ]	832

Tabla 3. Características independientes al vehículo.

A continuación se comparan los resultados de las distintas configuraciones:

Configuración A: Cabina actual – caja tipo A.

Vehicle characteristics	m [kg]	Cx	Area[m <sup>2</sup> ]	$\mu$	Engine efficiency
	35.000	0,65	10,2	0,012	0,4
Speed [Km/h]	Rt [KN]	%Rolling	%Rslope	%Rdrag	Fuel consumption[L/100km]
88	6,50	63,42	0,00	36,58	44,88

Tabla 4. Características y resultados de la configuración A.

- Configuración B: Cabina actual – caja tipo B. En esta configuración, se baja la altura del techo del semirremolque hasta alcanzar la altura de la cabina. La altura media de las cabinas con dormitorio es de 3266 mm.

Vehicle characteristics	m [kg]	Cx	Area[m <sup>2</sup> ]	$\mu$	Engine efficiency
	35.000	0,65	8,3283	0,012	0,4
Speed [Km/h]	Rt [KN]	%Rolling	%Rslope	%Rdrag	Fuel consumption[L/100km]
88	6,06	67,98	0,00	32,02	41,87

Tabla 5. Características y resultados de la configuración B.

**Respecto a la configuración A**, mediante la reducción del área frontal del vehículo del 18,35%, se consigue un **ahorro de combustible de un 6,71%**.

- Configuración C: Cabina actual – caja tipo B. En esta configuración, sólo se reduce la altura del techo del semirremolque de forma progresiva en su parte final.

Vehicle characteristics	m [kg]	Cx	Area[m <sup>2</sup> ]	$\mu$	Engine efficiency
	35.000	0,593	10,2	0,012	0,4
Speed [Km/h]	Rt [KN]	%Rolling	%Rslope	%Rdrag	Fuel consumption[L/100km]
88	6,29	65,52	0,00	34,48	43,44

Tabla 6. Características y resultados de la configuración C.

**Respecto a la configuración A**, mediante la reducción del Cx del 8,77%, se logra un **ahorro de consumo de combustible del 3,14%**.

- Configuración B+C: Cabina actual – caja tipo B. En esta configuración, se baja la altura del techo hasta alcanzar la altura de la cabina, y se baja la altura de la cola del semirremolque progresivamente.

Vehicle characteristics	m [kg]	Cx	Area[m <sup>2</sup> ]	μ	Engine efficiency
	35.000	0,593	8,3283	0,012	0,4
Speed [Km/h]	Rt [KN]	%Rolling	%Rslope	%Rdrag	Fuel consumption[L/100km]
88	5,89	69,94	0,00	30,06	40,69

Tabla 7. Características y resultados de la configuración B+C.

**Respecto a la configuración A**, mediante una reducción del Cx del 8,77% y una reducción del área frontal del vehículo del 18,35%, se logra un **ahorro de combustible de un 9,27%**.

- **Configuración A'**: Cabina diseño futuro – caja tipo A.

Vehicle characteristics	m [kg]	Cx	Area[m <sup>2</sup> ]	μ	Engine efficiency
	35.000	0,494	10,2	0,012	0,4
Speed [Km/h]	Rt [KN]	%Rolling	%Rslope	%Rdrag	Fuel consumption[L/100km]
88	5,93	69,52	0,00	30,48	40,94

Tabla 8. Características y resultados de la configuración A'.

**Respecto a la configuración A**, cambiando el diseño de la cabina se puede lograr un **ahorro de combustible un 8,72%**.

- **Configuración B'**: Cabina diseño futuro – caja tipo B. En esta configuración, se baja la altura del techo del semirremolque hasta alcanzar la altura de la cabina.

Vehicle characteristics	m [kg]	Cx	Area[m <sup>2</sup> ]	μ	Engine efficiency
	35.000	0,494	8,3283	0,012	0,4
Speed [Km/h]	Rt [KN]	%Rolling	%Rslope	%Rdrag	Fuel consumption[L/100km]
88	5,60	73,64	0,00	26,36	38,65

Tabla 9. Características y resultados de la configuración B'.

**Respecto a la configuración A**, mediante una reducción de Cx y una rebaja del área frontal del vehículo se consigue un **ahorro de combustible de un 13,82%**.

**Respecto a la configuración A'**, se consigue un **ahorro de combustible de un 5,59%**.

- **Configuración C'**: Cabina diseño futuro – caja tipo B. En esta configuración, sólo se reduce la altura del techo del semirremolque de forma progresiva en su parte final.

Vehicle characteristics	m [kg]	Cx	Area[m <sup>2</sup> ]	μ	Engine efficiency
	35.000	0,437	10,2	0,012	0,4
Speed [Km/h]	Rt [KN]	%Rolling	%Rslope	%Rdrag	Fuel consumption[L/100km]
88	5,72	72,05	0,00	27,95	39,50

Tabla 10. Características y resultados de la configuración C'.

**Respecto a la configuración A**, mediante una reducción de Cx de un 32,77%, se consigue un **ahorro de combustible de un 11,93%**.

**Respecto a la configuración A'**, se consigue un **ahorro de combustible de un 3,52%**.

- Configuración B'+C': Cabina diseño futuro - caja tipo B. En esta configuración, se baja la altura del techo hasta alcanzar la altura de la cabina, y se baja la altura de la parte final del semirremolque de forma progresiva.

Vehicle characteristics	m [kg]	Cx	Area[m <sup>2</sup> ]	μ	Engine efficiency
	35.000	0,437	8,3283	0,012	0,4
Speed [Km/h]	Rt [KN]	%Rolling	%Rslope	%Rdrag	Fuel consumption[L/100km]
88	5,43	75,95	0,00	24,05	37,47

*Tabla 11. Características y resultados de la configuración B'+C'.*

**Respecto a la configuración A**, se consigue un **ahorro de combustible de un 16,45%**.  
**Respecto a la configuración A'**, se consigue un **ahorro de combustible de un 8.47%**.

- Configuración sin carga: Cabina diseño actual - caja tipo A. Se estudia el caso en el que un camión convencional viaja sin carga.

Vehicle characteristics	m [kg]	Cx	Area[m <sup>2</sup> ]	μ	Engine efficiency
	13.000	0,65	10,2	0,012	0,4
Speed [Km/h]	Rt [KN]	%Rolling	%Rslope	%Rdrag	Fuel consumption[L/100km]
88	3,91	39,17	0,00	60,83	26,99

*Tabla 12. Características y resultados de la configuración sin carga.*

- Configuración sin carga A: Cabina diseño actual - caja tipo B. Se estudia el caso en el que el camión viaja sin carga. El semirremolque desciende la altura del techo hasta alcanzar la cabina, y baja progresivamente además la altura en la parte final del semirremolque.

Vehicle characteristics	m [kg]	Cx	Area[m <sup>2</sup> ]	μ	Engine efficiency
	13.000	0,593	8,3283	0,012	0,4
Speed [Km/h]	Rt [KN]	%Rolling	%Rslope	%Rdrag	Fuel consumption[L/100km]
88	3,30	46,36	0,00	53,64	22,80

*Tabla 13. Características y resultados de la configuración sin carga A.*

- Configuración sin carga A': Cabina diseño futuro - caja tipo B. Se estudia el caso en el que el camión viaja sin carga. El semirremolque desciende la altura del techo hasta alcanzar la cabina, y baja progresivamente además la altura en la parte final del semirremolque.

Vehicle characteristics	m [kg]	Cx	Area[m <sup>2</sup> ]	μ	Engine efficiency
	13.000	0,437	8,3283	0,012	0,4
Speed [Km/h]	Rt [KN]	%Rolling	%Rslope	%Rdrag	Fuel consumption[L/100km]
88	2,84	53,98	0,00	46,02	19,58

*Tabla 14. Características y resultados de la configuración sin carga A'.*

Cuando el camión viaja con el semirremolque vacío, la resistencia aerodinámica supone el 53,64% de la resistencia total del vehículo. Por lo tanto, la optimización de la eficiencia aerodinámica tiene resultados muy significativos en el consumo de combustible. **Empleando únicamente el semirremolque de geometría variable se**

logra un ahorro de combustible del 15,5%. En cabinas tractoras futuras, el ahorro de combustible alcanza el 27,45%

### 3.2.3 Análisis de los resultados aerodinámicos.

Resumen ahorros combustible en función de la configuración empleada.		
Configuración empleada	Reducción consumo[%]	Reducción consumo factor caja[%]
Configuración A	0	0
Configuración B	6,71	6,71
Configuración C	3,14	3,14
Configuración B+C	9,27	9,27
Configuración A'	8,72	0
Configuración B'	13,82	5,59
Configuración C'	11,93	3,52
Configuración (B+C)'	16,45	8,47
Configuración sin carga	0	0
Configuración sin carga A	15,5	15,5
Configuración sin carga A'	27,45	15,05

Tabla 15. Ahorro de consumo de combustible según la configuración empleada.

*Reducción consumo [%]* refleja el ahorro de combustible global en función de la configuración empleada. *Reducción consumo factor caja [%]* muestra de forma aislada la influencia de la forma del semirremolque en el consumo de combustible.

En el área de los motores de combustión interna, el margen de mejora respecto al límite termodinámico es cada vez menor, por lo que desde hace ya unos años se trabaja en busca de la eficiencia mediante la reducción de las distintas resistencias que afectan a los vehículos. Según los resultados, la resistencia aerodinámica de los camiones tiene un amplio margen de mejora. Bajo mi punto de vista, la búsqueda de la eficiencia debería ampliarse a todos los campos del camión, y no centrarse solamente en optimizar los sistemas de propulsión.

Actualmente, la reducción del consumo de combustible que se puede lograr mediante la variación en la forma del semirremolque oscila entre un 3,14% y un 9,27% dependiendo de la configuración empleada. La emisión de partículas contaminantes es directamente proporcional al consumo de combustible. A pesar de que la sustitución de los semirremolques actuales por los que se proponen en este TFG, de entrada, no supone un beneficio económico debido al sobrecoste del producto, sí supone un beneficio inmediato para el medio ambiente. En un vehículo que realiza 110.000 km/año, el **ahorro anual supondría entre 1.783 € y 5.263 € en consumo de combustible y entre 4,077 y 12,036 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>.**

Mención especial merece el resultado del camión cuando viaja libre de carga, ya que el ahorro de combustible alcanza el 15,5%.

Los resultados obtenidos revelan que existe un amplio margen de mejora en el aspecto aerodinámico de los conjuntos cabeza tractora-semirremolque. A la hora de evaluar estos resultados, debemos recordar que los datos corresponden a la situación en la que el camión circula a una velocidad constante de 88km/h sobre una superficie plana. Por lo tanto, el combustible que debe emplearse para vencer la inercia del conjunto y el que se necesita para superar los desniveles que proponga el recorrido realizado no está considerado. Los márgenes de ahorro de combustible porcentuales se reducirán con respecto a los obtenidos. Sin embargo, los resultados siguen mostrándose muy interesantes ya que suponen un ahorro económico importante.

## Capítulo 4.

# Diseño del semirremolque.

Una vez determinado que la variación en la forma del semirremolque genera importantes beneficios en términos económicos y ecológicos se procede a su diseño. A continuación se presenta el que se considera el diseño más apropiado para una caja de geometría variable para semirremolque.

### 4.1 Estructura del semirremolque.

La primera cuestión que debe plantearse es sobre qué tipo de semirremolque se va a desarrollar este TFG. Los semirremolques que transportan mercancías se clasifican en tres grupos: los de lonas, semilonas y rígidos.

- *El semirremolque rígido* se emplea fundamentalmente para mercancías con necesidad de refrigeración. Este tipo de vehículo se descartó por los inconvenientes que presenta contar con unas paredes laterales rígidas a la hora de bajar la altura de la carrocería.
- *El semirremolque de lonas* (laterales y techo de lona) es el que copa mayor porcentaje de mercado. La principal ventaja que tiene es que permite la carga por su parte superior, posterior, y lateral. Además es el más barato. En cambio, es el más vulnerable a los robos, ya que es relativamente fácil acceder a la mercancía a través de sus lonas laterales. En este caso, el semirremolque de lonas presentan el problema de que cuando se baje la altura total del techo, hay una parte de la lona lateral que debe recogerse. Por tanto, debe instalarse un tambor o un sistema similar que recoja la lona.
- *El semirremolque de semilonas* es un modelo mixto entre uno de lonas fijas y uno rígido. Permite la carga por la parte posterior, lateral y superior, y es menos vulnerable a los robos que el de lonas. Los laterales de este tipo de semirremolques están constituidos por lonas y por cartolas [1] en su parte inferior. Esta constitución ofrece una solución muy interesante al problema que presentaba el de lonas. En el semirremolque de geometría variable que se propone en este TFG, la lona ira amarrada a la parte superior de las cartolas. Cuando se baje la altura del semirremolque, la lona se amarrará a la parte inferior de las cartolas. Por ofrecer esta ventaja frente a los demás, para **el diseño de la caja de geometría variable se empleará un semirremolque de semilonas.**



*Ilustración 10. Semirremolque de semilonas. [www.mitrailer.com](http://www.mitrailer.com)*

[1] Plataformas rígidas que junto a las lonas conforman el semirremolque de semilonas.

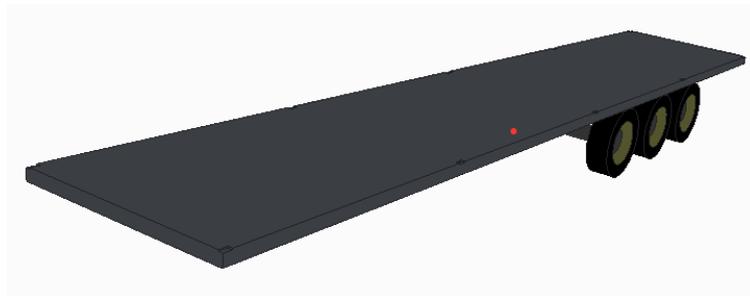
El semirremolque sobre el que se va a trabajar consta de tres ejes, formando con la cabina del camión un vehículo de cinco ejes, lo que le permite tener una masa máxima autorizada de 40 toneladas. Una vez determinada la constitución del semirremolque sobre el que vamos a trabajar, se procede a la descripción de los componentes que lo constituyen.

- Base, que sirve de soporte para todos los elementos del semirremolque.
- Postes telescópicos, que permiten variar la altura del semirremolque.
- Cartolas, que constituyen el vehículo de semilonas.
- Articulaciones, permiten bajar la altura de la parte final del semirremolque de forma progresiva.
- Largueros, sirven de soporte para las lonas laterales y del techo.
- Puerta, de tipo persiana.
- Tambor techo, recoge la lona cuando no se necesita.

### 4.1.1 Plataforma base.

Es la plataforma sobre la que se asientan la mayoría de los componentes del semirremolque. Las dimensiones con las que se ha trabajado son las mismas que emplea la empresa LeciTrailerS.A., que permiten el alojamiento de 34 europalets. Sobre la plataforma base se asientan:

- Dos correderas, ubicadas en los laterales del semirremolque, que permiten el desplazamiento longitudinal de los postes, permitiendo introducir todo tipo de cargas por los laterales. Sobre ellas se desplazan diez postes telescópicos con su correspondiente base y alimentados hidráulicamente, cuyo desplazamiento vertical permitirá variar la altura del semirremolque y adoptar distintas configuraciones.
- Cartolas: También sobre la base y colocados entre los postes telescópicos se colocan estos elementos propios de un semirremolque de semilonas.
- La puerta trasera, de tipo persiana y colocada en la parte final del semirremolque.



*Ilustración 11. Base del semirremolque.*

### 4.1.2 Postes telescópicos.

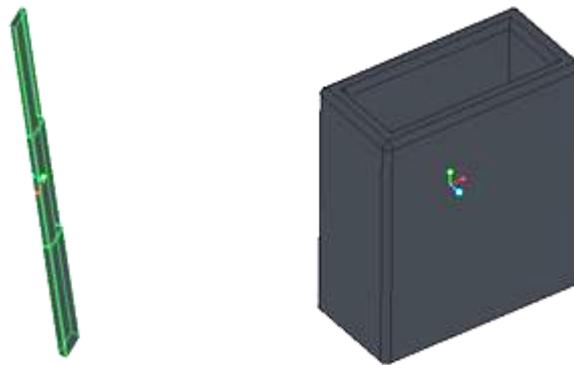
El semirremolque necesita diez postes telescópicos uniformemente distribuidos. Cada tramo de ellos mide 1200 mm. Según las dimensiones tomadas, la altura útil del semirremolque es de 2700 mm, por lo que los postes proporcionan una altura extra de 900 mm, convirtiendo el producto en un semilonas con elevación. Son rectangulares para ocupar el menor espacio de carga posible. Los cantos se redondean para evitar que rasguen las lonas del semirremolque. Los postes telescópicos se asientan sobre una base que le aportará rigidez y le protegen de posibles impactos que se produzcan durante las operaciones de carga y descarga de la mercancía. A su

vez, las bases de los postes que no se encuentran en las esquinas van montadas sobre correderas que posibilitan el desplazamiento longitudinal de los postes, lo que permite cargar cualquier tipo de mercancía por la zona lateral. Para poder desplazar los postes longitudinalmente se debe desacoplar el poste de la articulación. Un sistema mecánico posibilita esta acción. Los postes telescópicos cuentan con una válvula anti retorno, de forma que cuando el sistema haya alcanzado la altura deseada, el sistema hidráulico se puede desconectar.

El semirremolque requiere de un equipo hidráulico capaz de desplazar verticalmente los postes telescópicos que variarán la geometría del semirremolque. La presión de funcionamiento del sistema depende del área de los postes telescópicos y de la fuerza vertical que debe aplicarse para elevar el techo del semirremolque. Se calcula la presión del sistema para la situación más desfavorable, la de aquellos postes telescópicos que soportan el peso de la puerta. Dicha fuerza vertical se calcula considerando los siguientes parámetros:

- $Peso\ lona\ techo = 0,6 \frac{kg}{m^2} * (13,62 + 0,38)m^2 * 2,55 = 21,42\ kg$
- $Peso\ lona\ lateral = 0,9 \frac{kg}{m^2} * (13,62 * 2,7)m^2 * 2\ lados = 67,42\ kg$
- $Peso\ travesaño\ techo = 6,29\ kg$
- $Peso\ larguero\ techo = 20\ kg$
- $Peso\ puerta = 278,8\ kg$
- $Carga\ nieve = 1kN/m^2$
- $Coefficiente\ de\ seguridad = 2$
- $Área\ postes\ telescópicos = 1400mm^2$

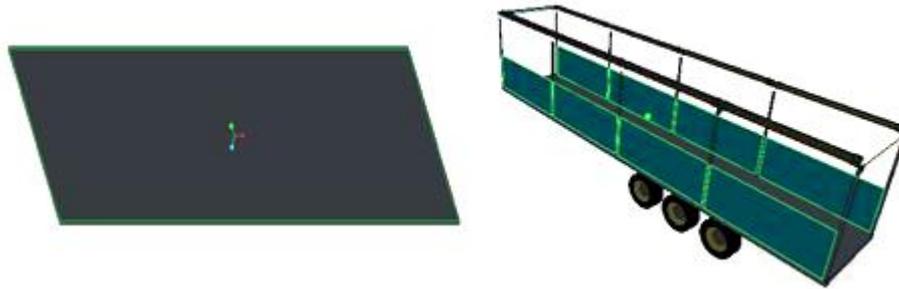
Considerando los pesos y cargas anteriores, la presión necesaria en el poste más desfavorecido es de:  $P = \frac{5827,5\ N}{1400\ mm^2} = 4,16\ MPa = 41,625\ bar$



*Ilustración 12. Figura 12- izda, postes telescópicos del semirremolque.  
Figura 12- dcha, base para postes telescópicos.*

### 4.1.3 Cartolas.

Las cartolas son las placas verticales propias de un semirremolque de semilonas. En la caja de geometría variable tienen principalmente dos funciones. La primera es la de dificultar el acceso al interior del vehículo desde los laterales del vehículo. La segunda y más importante, sirve en todo momento de amarre para las lonas laterales. Además, proporcionan rigidez a la estructura.

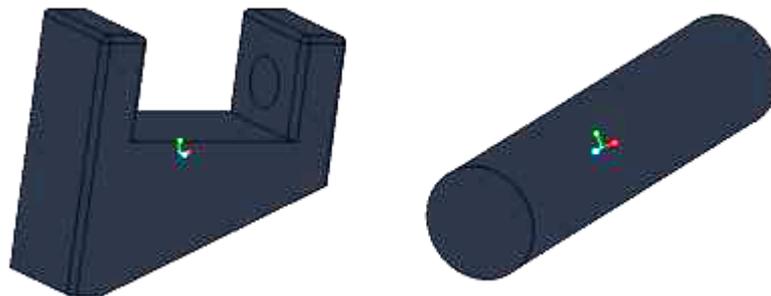


*Ilustración 13. Figura 13-izda, cartola.  
Figura 13-dcha, cartolas colocadas en el semirremolque.*

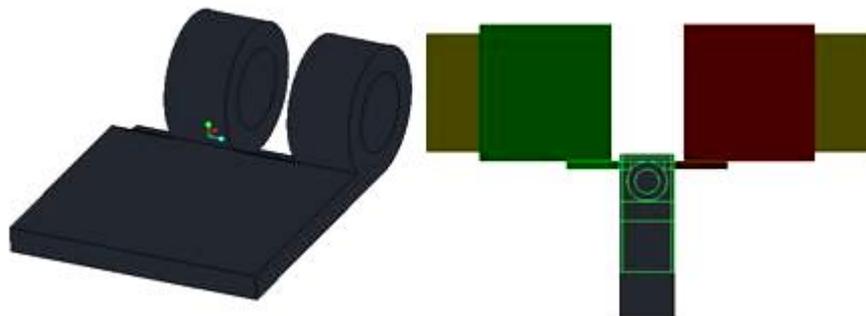
#### 4.1.4 Articulaciones.

Sobre los postes telescópicos se acoplan las articulaciones que permiten que la geometría del semirremolque se adapte a las características de la mercancía transportada y la caída en altura se produzca de forma progresiva. Las articulaciones se componen de cuatro piezas:

- Soporte de la articulación: Se soldará en la parte superior del poste telescópico.
- Pasador: Va alojado en el soporte y es el eje sobre el que se colocan las bisagras.
- Bisagras: Se colocan sobre el pasador, y se colocan dos en posiciones opuestas.
- 



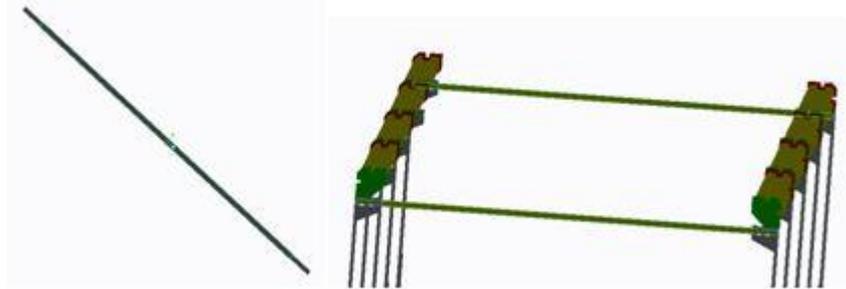
*Ilustración 14. Figura 14- izda, soporte de la articulación.  
Figura 14- dcha, pasador de la articulación..*



*Ilustración 15. Figura 15- izda, bisagra de la articulación.  
Figura 15- dcha, articulación completa.*

### 4.1.5 Travesaños del techo.

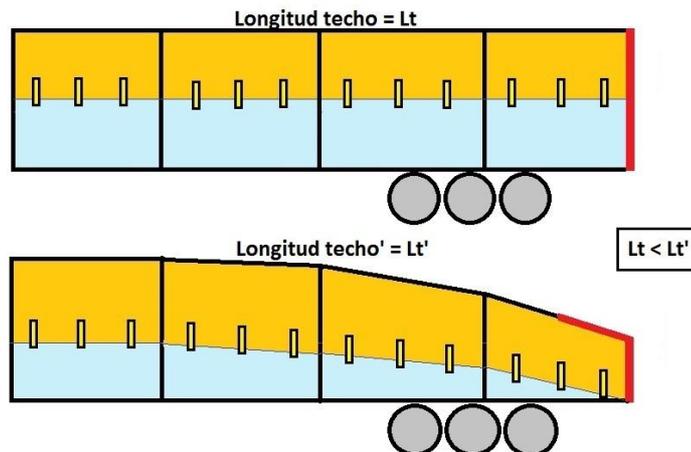
Consisten en una barra cilíndrica que se aloja directamente en el soporte de la articulación, sustituye la función del pasador y servirán de ejes a las bisagras. Forman, junto a los postes telescópicos, un puente que aportará rigidez a la estructura. Sólo se colocarán dos, uno entre los postes telescópicos delanteros, y otro entre los postes telescópicos de la puerta. Para permitir las cargas que se realizan a través del techo, no se instalarán travesaños entre los postes que se encuentran en el centro del semirremolque.



*Ilustración 16. Figura 16- izda, travesaño de la articulación.  
Figura 16- dcha, ubicación de los travesaños en el semirremolque.*

### 4.1.6 Largueros del techo extensibles.

En la parte superior del semirremolque se alojan ocho largueros que conectan todas las articulaciones. Los largueros se introducen en unos soportes que van soldados sobre las bisagras de las articulaciones. Cuando el semirremolque adapta su geometría a una determinada mercancía, los postes telescópicos adquieren distintas alturas para conseguir rebajar la parte final del semirremolque de una forma progresiva. La diferencia de alturas entre los postes hace que los largueros que los comunican tengan que ser extensibles. Las longitudes que se deben extender dependen de la configuración adoptada por el semirremolque, y es directamente proporcional a la diferencia de alturas de los postes.



*Ilustración 17.  $L_t < L_t'$*

En la *figura 18-izda* se muestra el perfil de dichos largueros. La **cavidad** que se encuentra en la parte **superior** servirá para albergar la corredera que permitirá **desplazar el techo**, operación que posibilitará realizar cargas por la parte superior. La **cavidad de la parte lateral** albergará la

corredera que permitirá desplazar la **lona lateral**. Al desplazar la lona y los postes telescópicos, se podrán introducir todo tipo de cargas laterales.

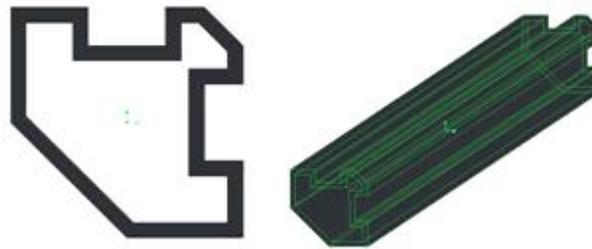


Ilustración 18. Figura 18- izda, perfil del larguero. Figura 18- dcha, larguero.

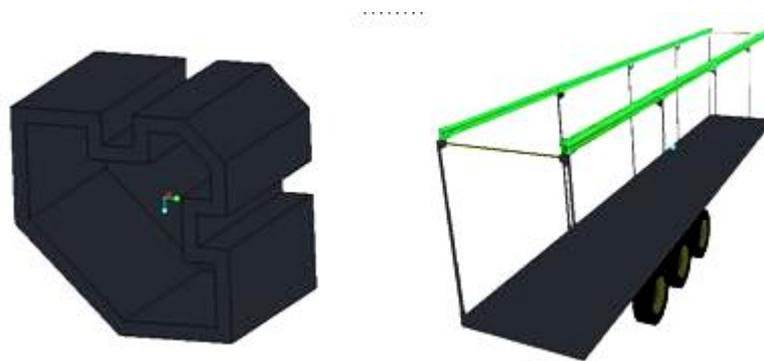


Ilustración 19. Figura 19- izda, ubicación de los largueros en el semirremolque.  
Figura 19- dcha, soporte de los largueros.

#### 4.1.7 Tambor para el techo.

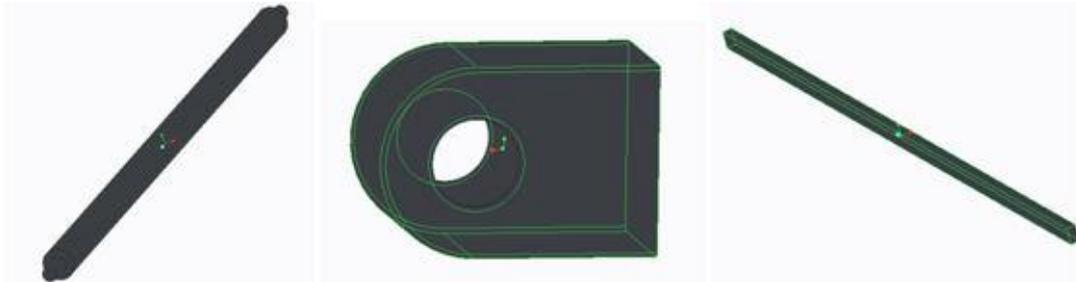
Como se muestra la *figura 17* del apartado 4.1.6, la longitud del techo varía en función de la geometría con la que el semirremolque está realizando el trayecto. La lona del techo debe ser suficiente para cubrir el semirremolque en cualquier circunstancia. Por tanto, se dan casos en los que hay un exceso de lona que hay que recoger (garantizar la estanqueidad del semirremolque debe ser una prioridad). Para resolver este conflicto se propusieron distintas soluciones.

Como se explica en el apartado 4.1.8, la puerta viaja parcialmente recogida en aquellos casos en los que se baja la altura tan solo en la parte final del semirremolque. Por lo tanto, una posible solución es enganchar la lona a la parte de la puerta que viaja recogida, compensando así el déficit de lona. Sin embargo, las complicaciones que supondrían tener que enganchar la lona del techo a la puerta a una altura de unos 2,5 metros descartaron esta opción.

Otra posible solución es contar con un techo a “modo de manta”, que cubriese por completo el semirremolque en su situación más desfavorable. Cuando se cambiase dicha configuración, la lona sobrante se tensa para que se adapte a la nueva forma del semirremolque. Como inconveniente, esta solución precisaría un tiempo para tensar la lona del techo excesivo. Además, se debe asegurar siempre la estanqueidad del semirremolque, por lo que este modelo podría provocar problemas si no se tensan bien las lonas.

Tras pensar las ventajas e inconvenientes de todas las alternativas, la configuración más adecuada consiste en colocar un tambor en la parte delantera del semirremolque. Se instalará tanta lona como requiera la configuración más desfavorable. **El exceso de lona** con el que nos encontramos en algunas configuraciones **se recoge en un tambor** que irá colocado **en la parte delantera del techo del semirremolque**. Dicho tambor está constituido por dos soportes, un eje

y una pieza que servirá para enganchar la lona al tambor. Los soportes del tambor se soldarán a los soportes de los largueros de la parte delantera del semirremolque. El tambor e recoge mediante un sistema manual.



*Ilustración 20. Figura 20- izda, tambor.  
Figura 20- centro, soporte del tambor.  
Figura 20- dcha, enganche lona-tambor.*

#### 4.1.8 Puerta.

El principal problema que presenta la caja de geometría variable para semirremolque es que en función de la mercancía transportada, la longitud de la puerta es variable.

Las puertas “tipo libro” características de los semirremolques de carretera europeos neutralizarían por completo el beneficio aerodinámico generado a través de la caída en la altura del semirremolque en su parte final, por lo que se descarta su instalación.

Una posible solución resuelve dos problemas a través del mismo mecanismo. Se trataría de un techo unido a una puerta tipo persiana. Se recogerían desde la parte frontal del semirremolque a través de un tambor. La parte de lona sobrante se recoge en el tambor en aquellos casos en los que no se requiere. El motivo por el que se ha descartado esta opción es que cada vez que se requiere abrir la puerta debe desplazarse todo el techo.

Una puerta telescópica es también una alternativa interesante. Sin embargo, su mayor tiempo de operación, sumado a su vulnerabilidad ante posibles sabotajes hacen que se haya descartado esta opción.

Finalmente, parece que la **solución más apropiada** es la de instalar una **puerta tipo persiana**. Este tipo de puerta ha sido elegido por no presentar ningún problema a la hora de cambiar la configuración del vehículo (en el apartado 4.2 se explica con mayor detenimiento). El inconveniente que presenta esta puerta es que cuando la puerta está abierta se aloja en la parte superior del semirremolque, por lo que limita la altura y la anchura de carga útil de la parte posterior del mismo. La reducción de la altura útil de carga es de 205 mm, pasando de 2700 mm a 2495 mm. La reducción de anchura útil de carga es de 116 mm, pasando de 2480 mm a 2364 mm.



*Ilustración 21. Figura 22-izda, puerta tipo persiana cerrada. [www.fstrailer.com](http://www.fstrailer.com).  
Figura 22-dcha, puerta tipo persiana abierta. [www.flickrhivemind.net](http://www.flickrhivemind.net)*

## 4.2 Funcionamiento del mecanismo.

Tras haber realizado el modelado de cada una de las piezas que componen el semirremolque se ha procedido al ensamblaje de las mismas. Mediante la acción conjunta de cada las piezas explicadas en el punto 4.1 se forma el mecanismo que permite al semirremolque variar la geometría.

### 4.2.1 Principio de funcionamiento de la puerta tipo persiana.

Analicemos las distintas situaciones de trabajo a la que se debe enfrentarse la puerta en función del trayecto realizado.

- Cuando el semirremolque adapta su geometría hasta alcanzar las dimensiones máximas, la altura en la parte posterior del semirremolque es la misma que la longitud de la puerta. Por lo tanto, la totalidad de la puerta realizará el desplazamiento en posición vertical.
- Cuando el semirremolque adquiere cualquier otra geometría, la altura en la zona posterior del vehículo se reduce. La longitud de la puerta es mayor que la de la altura en la zona posterior del semirremolque, por lo que parte de ésta deberá realizar el desplazamiento recogida junto al techo del semirremolque. La parte de puerta que realiza el transporte en estas condiciones depende de la forma adoptada por el semirremolque.

La versatilidad para las distintas configuraciones que ofrece este tipo de puerta hace que sea la más adecuada para este proyecto.

Esta puerta se recoge en la parte superior del semirremolque.

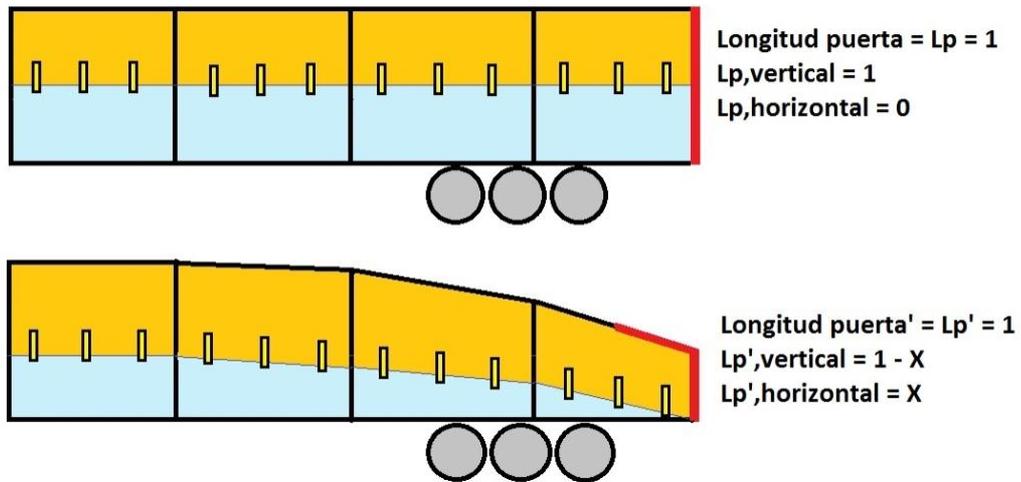


Ilustración 22. Esquema de funcionamiento de la puerta

#### 4.2.2 Principio de funcionamiento del mecanismo que permite variar la forma del semirremolque.

Las posibles variaciones de forma que podemos realizar son:

- Variación uniforme de la altura del semirremolque:** El equipo hidráulico alimenta todos los postes telescópicos a la vez. El techo del semirremolque se desplaza verticalmente de manera uniforme, modificando la altura del semirremolque. El único elemento que debe variar sus dimensiones son los postes telescópicos. Una vez adoptada la altura deseada, el equipo hidráulico se desconecta, y las válvulas anti retorno de los postes telescópicos fijan la posición del techo. Ni las articulaciones ni los tramos extensibles de los largueros actúan ya que el techo no sufre ninguna variación en sus dimensiones. Por último, se debe enganchar y tensar de nuevo la lona a las cartolas.

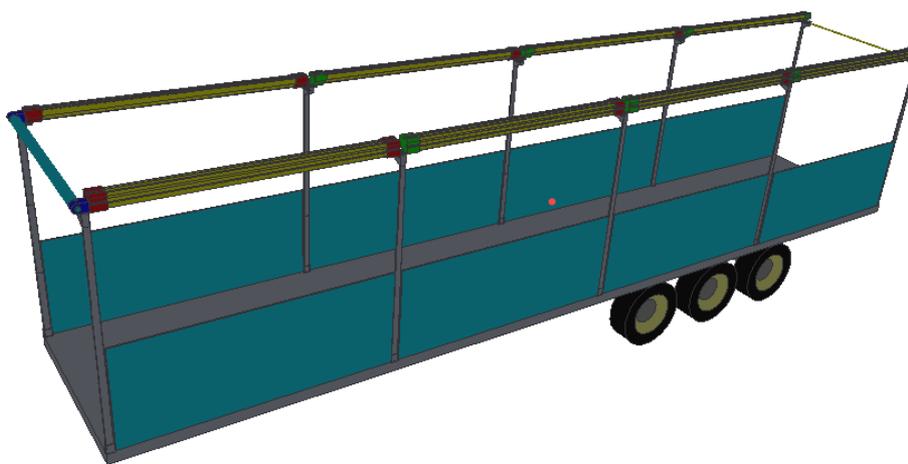
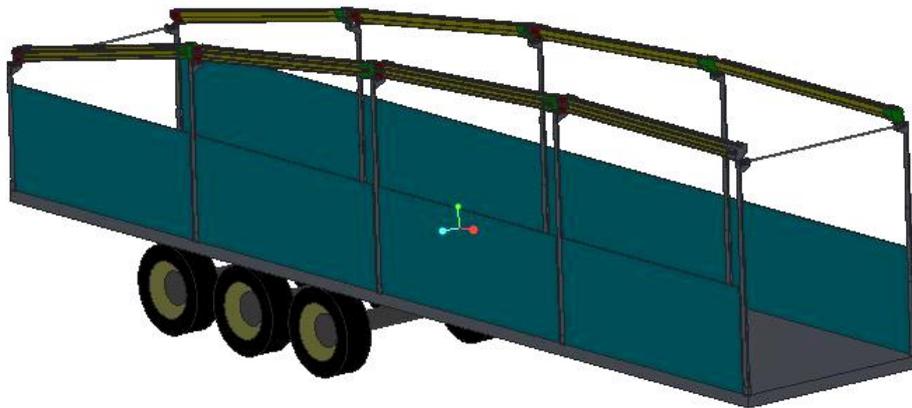


Ilustración 23. Semirremolque de geometría variable, configuración 100% volumen de carga.

- b) Variación heterogénea de la altura del semirremolque. El equipo hidráulico alimenta por separado cada par de postes telescópicos que se encuentran a la misma distancia de la parte inicial del semirremolque. De esta manera se puede adaptar gradualmente la altura del semirremolque a la mercancía que se transporta. Las articulaciones y los tramos extensibles de los largueros son elementos creados para permitir modificar la altura de los postes de manera independiente. Las articulaciones permiten la reorientación angular de los largueros. Los tramos extensibles de los largueros compensan las variaciones de longitud que se producen en el espacio existente entre dos articulaciones de dos postes telescópicos consecutivos que han adoptado alturas distintas.



*Ilustración 24. Semirremolque de geometría variable, configuración para optimizar la eficiencia aerodinámica.*

#### 4.2.2 Procedimiento de uso.

Con el fin de proteger a los distintos elementos que conforman el semirremolque, se propone el siguiente procedimiento de uso:

1. Abrir completamente la puerta.
2. Soltar las lonas laterales de las cartolas.
3. Operar con el equipo hidráulico para variar la altura del semirremolque hasta lograr la dimensión deseada.
4. Cerrar la puerta.
5. Atar las lonas laterales a las cartolas.
6. Tensar las lonas laterales para garantizar la estanqueidad del semirremolque.

## Capítulo 5.

# Conclusiones.

---

La necesidad de evolucionar el transporte por carretera hacia un modelo más sostenible ha llevado a la industria automotriz a mejorar día a día la eficiencia de sus vehículos. La Unión Europea, a través de las sucesivas normas Euro, exige límites de emisiones contaminantes cada vez más estrictos. Los motores de combustión interna cuentan con un margen de mejora respecto a su límite termodinámico cada vez menor. En consecuencia, mejorar la eficiencia de los motores térmicos se ha convertido en una tarea muy complicada. En este estudio se ha cuantificado que, **en un camión, mediante la optimización del diseño de cabina y semirremolque se puede reducir el coeficiente de penetración aerodinámico un 34,9%**, margen muy superior al que se puede obtener a través la optimización de los motores térmicos. Bajo mi punto de vista, debemos adoptar una visión global del vehículo, y entender que para reducir las emisiones de los camiones debemos actuar sobre todos los factores que intervienen en el consumo, y no centrarnos únicamente en la optimización de los sistemas de propulsión.

Los diseños actuales de cabinas y semirremolques que circulan por nuestras carreteras son absolutamente ineficiente en términos aerodinámicos, por lo que bajo mi punto de vista, **ha llegado el momento de cambiar la forma de los camiones**. Los semirremolques que han dominado el mercado durante más de 85 años deben ceder el paso a una nueva generación. Este nuevo tipo de semirremolques de diseño renovado, que disminuyen sustancialmente la resistencia aerodinámica, impulsará al sector del transporte de mercancías por carretera hacia un modelo más económico y respetuoso con el medio ambiente. .

Cualquier beneficio en el consumo en un vehículo que realiza alrededor de 110.000 km/año, por pequeño que sea, representa un ahorro muy significativo. El semirremolque planteado en este Trabajo Fin de Grado reduce el consumo de combustible de un camión cargado entre un 3,14% y un 9,27%, dependiendo de la configuración empleada. Estos valores suponen un **ahorro anual que oscila entre 1.783 € y 5.263 € en consumo de combustible y entre 4,07 y 12,036 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>**. Cuando el camión viaja sin carga en el semirremolque, la reducción del consumo de combustible alcanza incluso el 15,5%.

Por si la reducción de los consumos y emisión de gases contaminantes del nuevo modelo no fueran argumentos suficientemente, podemos además afirmar que esta nueva propuesta de semirremolque aquí planteado **mejora la seguridad** del vehículo. Fuertes ráfagas de viento lateral pueden llegar a provocar el vuelco en un camión que viaja con el semirremolque vacío. Al bajar la altura del semirremolque disminuye su área lateral y la distancia media de ésta suelo. Consecuentemente, el momento angular que genera el viento al incidir sobre la superficie lateral se reduce, minimizando el riesgo de vuelco y/o accidente. Por lo tanto, **el semirremolque que se propone para este TFG no sólo genera un transporte por carretera más limpio y económico, sino que también mejora la seguridad del transportista y de todos nosotros**.

Las mejoras que este estudio aporta suponen un considerable beneficio que indiscutiblemente favorecen la economía del transportista. Los resultados de emisiones de gases contaminantes son contundentes, y los beneficios de seguridad son incuestionables. En mi opinión, **el debate no debería ser si debemos cambiar el diseño de los camiones y semirremolques, sino cuándo se va a producir dicho cambio**.

Que el diseño de los semirremolques cambiará en un futuro próximo no me genera ninguna duda. Si el cambio se realizará hacia una caja de geometría fija o una de geometría variable no está tan claro. La ventaja con la que cuenta el semirremolque de geometría fija frente al segundo

## Diseño de caja de geometría variable para semirremolque.

---

es un menor coste de fabricación dado que se trata de un diseño más simple. Sin embargo, maximizar el espacio de carga útil es la gran prioridad con la que trabajan hoy los fabricantes de semirremolques, por lo que cualquier diseño que perjudique este principio tendrá un mercado mucho más reducido.

Por tanto, **la opción de la caja de geometría variable para semirremolque es la más adecuada.** El éxito o fracaso del proyecto dependerá en gran medida de su precio y amortización.

## Futuras líneas de trabajo.

El estudio y diseño completo de un nuevo modelo de semirremolque conlleva una carga de trabajo enorme, por lo que supera ampliamente el tiempo que un Trabajo Fin de Grado requiere. Mi intención personal es seguir trabajando con este proyecto una vez finalizado el Grado de Ingeniería Mecánica. Complementariamente, se deja este TFG a disposición de cualquier estudiante de la Universidad de Zaragoza que esté interesado en colaborar en el estudio de la caja de geometría variable para semirremolque. Por lo tanto, a continuación se proponen futuras líneas de trabajo que completarían el estudio que se ha elaborado en este documento.

Posibles líneas de trabajo futuras son:

- Diseño de detalle de cada una de las piezas propuestas.
- Con el fin de efectuar el correcto dimensionado de cada pieza, se requiere la realización de los análisis resistentes de cada una de las piezas propuestas.
- Con el fin de obtener datos más precisos del coeficiente de penetración aerodinámico, consumo de combustible y emisión de partículas contaminantes, se propone realizar un estudio aerodinámico mediante herramienta computacional.
- Estudio de las posibles ayudas que pudieran contribuir a la financiación del proyecto debido a que se trata de un producto que contribuye a un modelo de transporte de mercancías por carretera más sostenible.
- Estudio de costes y amortización del producto.

## Bibliografía.

---

1. Hirz M, Stadler S. A new approach for the reduction of aerodynamic drag of long-distance transportation vehicles. SAE Int. J. Commer. Veh. 6(2):2013, do:10.4271/2013-01-2414.
2. Richardson Andrew, inventor; Don Bur, assignee. Trailer or container with a curved roof. United Kingdom patent: 2443035-A. April, 23, 2008.
3. Richardson Andrew, inventor; Don Bur, assignee. Improvements in or relating to trailers or containers. United Kingdom patent: 2474379-A. April, 13, 2011.
4. de la Torre San José, Rafael; Ribera Bodi, Jorge Manuel, inventores. Variable and optimized aero-shape truck box. European patent: 2529966-A1. May, 28, 2011.
5. Pérez Arriaga JI, Moreno Romero A. La contribución de las TIC a la sostenibilidad del transporte en España. Real Academia de Ingeniería; 2009.
6. Diariomotor.com, 12 de febrero de 2014. [22 de febrero de 2015] ¿Tendremos que cambiar el diseño de los camiones? David Clavero. <http://www.diariomotor.com/tecmovia/2014/02/12/tendremos-que-cambiar-el-diseno-de-los-camiones/>
7. sae.org, The ultimate knowledge source for mobility engineering. 2015. [25 de febrero de 2015]. <https://www.sae.org>
8. donbur.co.uk, Staffordshire: A guide to aerodynamics. [27 de febrero de 2015]. <http://www.donbur.co.uk/eng/info/aerodynamics.php>
9. europa.eu, Bruselas: European Commission. Nuevas normas de la UE para unos camiones más seguros y ecológicos. 15 de abril de 2013. [9 de junio de 2015]. [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-13-328\\_es.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-328_es.htm)
10. Canciclimatic.gencat.cat, Generalitat de Catalunya Comisión interdepartamental de cambio climático. Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). 2011 [20 de Agosto de 2015]. [http://canciclimatic.gencat.cat/web/.content/home/politiques/politiques\\_catalanes/la\\_mitigacio\\_del\\_canvi\\_climatic/guia\\_de\\_calcul\\_demissions\\_de\\_co2/120301\\_guia\\_practica\\_calcul\\_emissions\\_rev\\_es.pdf](http://canciclimatic.gencat.cat/web/.content/home/politiques/politiques_catalanes/la_mitigacio_del_canvi_climatic/guia_de_calcul_demissions_de_co2/120301_guia_practica_calcul_emissions_rev_es.pdf)
11. fomento.gob.es, Gobierno de España Ministerio de fomento. Estudio de costes del transporte de mercancías por carretera. Resumen ejecutivo. 12 de diciembre de 2008. [20 de septiembre de 2015]. <http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/D12A4405-3DE8-4D87-8F06-8CED0E11DD3E/40278/EstudioCostesMercanciasCarreteraoctubre2008.pdf>

