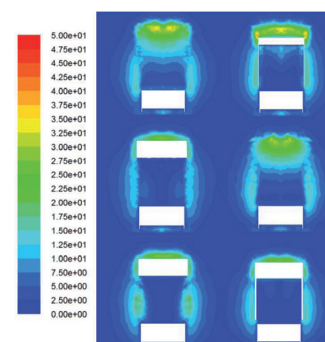


Análisis de mejoras aerodinámicas para el hueco de king-pin en vehículos semirremolque

Aerodynamic analysis of king-pin gap improvements for heavy-duty vehicles



Ramón Miralbés-Buil

Universidad de Zaragoza. Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación. C/ María de Luna, s/n - 50017. (España). miralbes@unizar.es

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7666> | Recibido: 25/05/2015 • Aceptado: 22/09/2015

ABSTRACT

- The aim of this article is the aerodynamical study of the use of improvement placed in the frontal area of the semi-trailer to reduce the aerodynamic resistance of the King-pin gap. There are some improvements and some patents of this type of devices and accessories that improve the aerodynamic efficiency of the vehicle, and so, a reduction of the fuel consumption (nose cones, vortex trap, etc.), but in some of them there are no experimental or numerical analysis of these benefits but in a few there are. So some of these improvements are going to be analyzed using numerical tools and comparing the results with the results of the vehicle without them. The devices studied are based on the geometries of some commercial improvements and patents for heavy vehicles and for other kinds of vehicles that have been modified to be used in this kind of vehicles. To carry out the numerical analysis, the CFD methodology, using FLUENT, has been used since it allows simulating some geometries and modifications of the geometry without making physical prototypes.
- **Keywords:** king-pin, aerodynamic, vehicle, articulated, heavy, CFD, trailer, lorry.

RESUMEN

El objetivo de este artículo es el estudio aerodinámico del uso de mejoras aerodinámicas colocadas en la zona delantera del semirremolque para reducir la resistencia aerodinámica en el hueco de King-pin.

Existen muchas mejoras y patentes de este tipo de dispositivos y accesorios que mejoran la eficiencia del vehículo, y, por tanto, reducen el consumo de combustible como narices aerodinámicas, trampas de vorticidad, etc. pero en muchos de ellos no existen resultados experimentales o numéricos de dichos beneficios que permitan cuantificarlos aunque sí que existen algunos.

Por ello estas mejoras van a ser analizadas mediante el uso de técnicas numéricas y mediante un análisis comparativo de los resultados del vehículo con y sin ellos.

Las mejoras estudiadas están basadas en la geometría de diversos dispositivos comerciales y patentes para vehículos pesados y para otro tipo de vehículos y han sido adaptados a este tipo de vehículos.

Para llevar a cabo el análisis numérico se ha utilizado una metodología CFD mediante el programa comercial FLUENT, que permite la simulación y modificación de geometrías sin necesidad de construir prototipos reales.

Palabras clave: King-pin, aerodinámica, vehículo, articulado, pesado, CDF, tráiler, camión.

1. INTRODUCCIÓN

La aerodinámica es especialmente importante en el diseño de cualquier tipo de vehículo pero tradicionalmente ha sido un campo ligado a la industria aeroespacial por lo que en algunos otros campos de interés no ha sido aplicada con tanta profundidad; uno de estos campos ha sido el diseño de semirremolques para vehículos articulados aunque existen algunos artículos que han estudiado y recopilado experiencias al respecto [1,2]. En ambos trabajos se pone de manifiesto la influencia que tiene el espacio que existe entre la tractora y el semirremolque en el comportamiento aerodinámico del vehículo completo.

Actualmente y hace poco tiempo algunos factores como el precio del combustible, las políticas verdes, las necesidades de reducción de los gases de efecto invernadero y la polución, especialmente en ciudades y zonas densamente pobladas, etc. han influido en el sector de la industria automovilística y obligándolos a producir vehículos que deben ser menos contaminantes y más eficientes en términos de energía. Todo ello ha generado una modificación en los criterios de diseño de los vehículos y la investigación y desarrollo de técnicas que permitan mejorar estos aspectos del diseño. En este sentido la aerodinámica es una de las estrategias que permite, únicamente variando la forma exterior, introduciendo elementos aerodinámicos y/o disminuyendo los huecos y las tolerancias entre piezas mejorar los diversos factores de diseño anteriormente mencionados.

Es por ello que recientemente han aparecido algunos vehículos pesados que han modificado sustancialmente su apariencia exterior frente a otros diseños más clásicos con el objetivo de reducir tanto el área transversal como el coeficiente de penetración aerodinámica, reemplazando las formas y esquinas rectas por otras más sinuosas, estilizadas y redondeadas [3]. Estos desarrollos son el resultado de la estricta aplicación de criterios de diseño aerodinámicos para mejorar la eficiencia y reducir el consumo de energía y por tanto de combustible, ya que, aproximadamente la mitad de la energía que utiliza un vehículo se usa para contrarrestar la resistencia del aire.

En los últimos treinta años, el coeficiente de penetración aerodinámica de los automóviles se ha reducido en un 40%, un hecho que lleva asociado una reducción en el consumo de combustible aproximado del 19%. Sin embargo en el sector de los vehículos pesados articulados no se ha producido una reducción tan significativa aunque se ha trabajado intensamente en la reducción en la cabina pero se ha dejado de lado el semirremolque. El estudio de la aerodinámica en los semirremolques resulta fundamental en un futuro a corto-medio plazo para obtener vehículos más eficientes, menos contaminantes y para cumplir con las nuevas normativas europeas de emisiones; se estima que es posible una reducción del consumo de combustible de hasta el 15-20% [4].

En términos de relación entre la reducción en el consumo de combustible y en el coeficiente de penetración aerodinámica, para un vehículo pesado que suele trabajar en rutas interurbanas, una mejora de la aerodinámica del 20% supone una reducción del 10% en el consumo de combustible con un ahorro estimado de 13.000 litros y una reducción de las emisiones de dióxido de carbono de cerca de 30 toneladas [5].

También se debe tener en mente que la mejora en la aerodinámica de un semirremolque no solo influye en el consumo de combustible sino también en la potencia del vehículo requerido; por otro lado influye reduciendo el efecto de succión sobre otros vehículos, en caso de lluvia reduciendo el efecto de salpicadura y en caso de viento el arrastre lateral debido a vientos cruzados por lo que se obtiene un vehículo más seguro.

Actualmente existen algunas mejoras aerodinámicas en el mercado para vehículos pesado entre las que cabe destacar los generadores de vorticidad (GVs) que pueden aplicarse en diversas zonas de vehículo.

Antes de entrar en un estudio en detalle de las mejoras aerodinámicas implementadas en vehículos, cabe reseñar la influencia de la misma que puede verse en la ecuación de Clarks [6]:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot C_x \cdot A_t \cdot V^3 + \mu \cdot M \cdot G \cdot V + M \cdot G \cdot V \cdot \sin \theta \quad (1)$$

Como se puede apreciar la potencia requerida para mover un vehículo (P) depende de forma cúbica con la velocidad (V) mientras que la dependencia del resto de parámetros es lineal con la misma. Es por ello que la aerodinámica resulta especialmente efectiva en vehículos que se desplazan a altas velocidades mientras que a bajas velocidades otros aspectos como el peso máximo del vehículo (M) tienen mucha más influencia por lo que las mejoras aerodinámicas se recomiendan para vehículos que habitualmente viajan a velocidades medio-altas.

Si se analiza en detalle la anterior ecuación existen algunos otros factores que pueden modificarse: el área trasversal del vehículo (A_t), el coeficiente de penetración aerodinámico (C_x) y el coeficiente de resistencia a la rodadura de los neumáticos (μ).

En relación con el área trasversal en los vehículos pesados (A_t), ésta viene determinada por las dimensiones del semirremolque y de la tractora tanto de altura como de anchura por lo que el uso de semirremolques con chasis bajos permite reducir la altura del mismo con la misma capacidad y dimensiones de carga y con ello reducir la altura de la tractora modificando la altura del spoiler superior y con ello se mejora la aerodinámica del vehículo.

En relación con el coeficiente de penetración aerodinámico (C_x) es posible reducirlo mediante el uso de mejoras aerodinámicas; en este punto se debe señalar que estas mejoras y dispositivos pueden utilizarse tanto en la tractora como en el semirremolque

pero que es en este último donde se producen el 70% de las pérdidas aerodinámicas. Analizando las principales zonas de pérdidas aerodinámicas, estas son la zona frontal de la tractora (20-25%), el hueco de King-pin (15-20%), la zona de las ruedas y la parte inferior del vehículo (25-30%) y la zona posterior del tráiler donde aparece un efecto de succión (20-25%). En estas zonas se producen altas presiones, un estancamiento del flujo de aire y por tanto altas pérdidas aerodinámicas.

Se debe indicar también que en algunos trabajos anteriores de Miralbé y Castejón se han estudiado algunas mejoras aerodinámicas para semirremolques de tipo cisterna [7], el uso de generadores de vorticidad en vehículos pesados [8] y el uso de mejoras en la zona posterior del semirremolque [9]. La principal diferencia de este artículo con los mencionados se basa en que en éste se analiza otra zona específica del vehículo pesado en el caso de un semirremolque de caja cuadrada.

2. PRINCIPALES MEJORAS AERODINÁMICAS PARA EL HUECO DE KING-PIN

Habitualmente en el hueco de King-Pin de los vehículos pesados la forma de la cabeza tractora termina de forma abrupta y la parte frontal del semirremolque empieza también de la misma forma, por ello aparecen en esta zona altas turbulencias y zonas con altas pérdidas aerodinámicas que implican un aumento del 20% del coeficiente aerodinámico (ver figura 1 del material web adicional); este efecto aparece porque este tipo de formas abruptas y cambios de geometría generan una separación del flujo de aire y grandes vórtices con una gran turbulencia asociada.

Para reducir dichos vórtices existen diversas mejoras comerciales que se localizan en la parte trasera de la cabina que se han desarrollado y analizado y que son relativamente usuales; la figura 1 muestra dos de estas mejoras: los spoilers del techo y los deflectores laterales.

Por otro lado se debe indicar que no son habituales los dispositivos colocados en la parte delantera del semirremolque y que no existe demasiada experiencia respecto de sus beneficios y del potencial que tienen en la reducción del coeficiente de penetración aerodinámica por lo que este artículo se centra en este tipo de dispositivos utilizando como herramienta de análisis las herramientas numéricas de diseño fluido dinámico (CFD).

En este artículo se van a analizar tres conceptos diferentes de mejoras aerodinámicas para semirremolques: el uso de collares frontales para el semirremolque, el uso de narices aerodinámicas y el uso de trampas de vorticidad.

Los collares frontales (ver figura 1 del material web adicional) se basan en los collares de la cabina (ver figura 1 del material web adicional) y pueden usarse de forma conjunta; el objetivo es la reducción del espacio libre lateral en la zona de King-pin utilizando paneles; con ello se podrá reconducir y controlar el flujo de aire evitando los cambios abruptos en su trayectoria (debido a la geometría de la zona) y se reducirá el espacio libre. Estos dispositivos se pueden utilizar tanto en la zona lateral como en la superior del semirremolque.

La figura 3 muestra los modelos CAD de un semirremolque con nariz aerodinámica basada en el Nose Cone [10], además de las trampas de vorticidad, los collares y el uso conjunto de diversos de estos dispositivos.

Las trampas de vorticidad (ver figura 1 del material web adicional) se usan para reducir la intensidad de los vórtices y se basan en la patente de Solus [11]; su funcionamiento se basa en la ruptura de los grandes vórtices con gran intensidad en otros menores

atrapados en la propia trampa con una intensidad mucho menor. Adicionalmente se ha estudiado dos diseños que combinan generadores de vorticidad y narices aerodinámicas por un lado y por otro lado narices aerodinámicas con collares laterales.

3. METODOLOGÍA PARA EL CALCULO UTILIZANDO HERRAMIENTAS CFD

Se ha utilizado en software comercial libre OPEN Foam para el cálculo de los diversos tipos de configuraciones utilizando la siguiente metodología:

3.1. MODELADO CAD

El primer paso para realizar el análisis es el modelado CAD de la forma exterior del vehículo pero esta debe simplificarse para reducir la complejidad numérica y los requerimientos de cálculo eliminando y simplificando algunos elementos como espejos retrovisores, intermitentes, pequeños accesorios exteriores y otros accesorios que requerirían complejas y detalladas discretizaciones de elementos finitos pero que no aportarían datos ni resultados significativos [5,6]

En este caso particular se ha partido de las dimensiones exteriores de un vehículo articulado tipo de caja cuadrada tanto de la caja como de la tractora. La figura 1 muestra los seis modelos CAD utilizados para las diversas simulaciones.

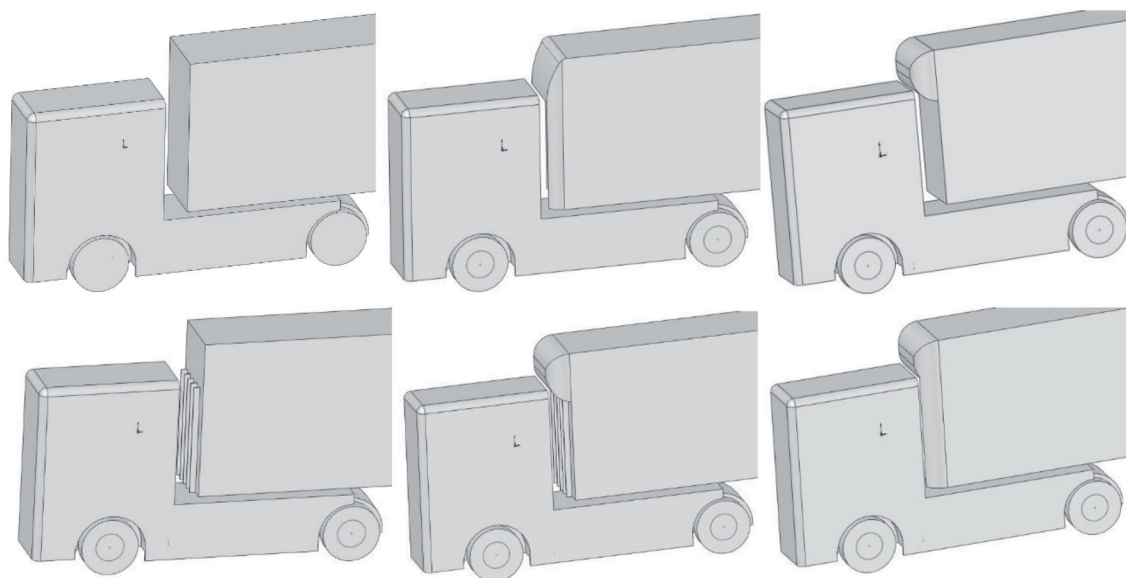


Fig. 1: Modelos CAD: sin mejoras (arriba-izquierda) con collar (arriba-medio) con trampas de vorticidad (abajo izquierda) con trampas de vorticidad y nariz aerodinámica (abajo medio) y con nariz aerodinámica y collar (abajo derecha)

La cabeza tractor utilizada se basa en una tipo donde se han eliminado todos los accesorios aerodinámicos adicionales que pueda utilizar: spoilers, collares laterales, spoiler del parachoques, etc. No se han incluido estos elementos porque el objetivo es analizar los que se sitúan en el semirremolque y su influencia en un vehículo básico y porque pueden presentar diversas configuraciones que pueden influir en los resultados y en el propio análisis. Por otro lado su contribución en la aerodinámica general es muy baja.

Tampoco se ha considerado la influencia de la toma de aire del radiador que requeriría un modelo de elementos finitos muy complejo y aumentaría considerablemente la complejidad numérica pero sin aportar resultados al realizarse un análisis comparativo entre modelos [12, 13 y 14]. En este sentido también las luces de galibo y las canalizaciones y mangueras de conexión de han elimi-

nado al igual que se ha simplificado la zona inferior del vehículo por una zona plana.

En relación con las ruedas el hueco del vehículo y el espacio de la rueda se ha mantenido para realizar un modelado correcto ya que influye significativamente en la aerodinámica del vehículo y en algunas de las zonas de estudio [12, 13 y 14]. Se debe indicar también que se ha utilizado un modelo con simetría por el plano medio para reducir la complejidad de la discretización, el coste computacional y el tiempo y complejidad de cálculo ya que tanto el modelo como las condiciones de contorno lo permiten.

3.2. DISCRETIZACIÓN CON ELEMENTOS VOLUMÉTRICOS

Para la discretización mediante elementos finitos se ha partido de los diversos modelos CAD del vehículo que se ha introducido para simular el aire mediante la resta a un volumen suficiente (simulado como un prisma rectangular) y mediante la resta del CAD del vehículo para la obtención del aire que circunvala el vehículo. Se han utilizado las distancias que diversos autores recomiendan [12, 13 y 14] y el propio programa para este tipo de análisis.

Por ello debe existir una distancia de 55 m de aire desde la zona delantera del vehículo y la entrada de aire, una distancia de 375 m desde la parte trasera del vehículo y la zona de salida de aire para simular correctamente la ola aguas atrás que genera el vehículo [15]. En relación con la zona lateral y superior debe existir una distancia de alrededor de 45 metros alrededor del vehícu-

lo. Todo ello se corresponde con unas dimensiones de $5L \times 15L \times 3L$, siendo L la longitud total del vehículo

Las dimensiones de este volumen es independiente del modelo CAD y permite introducir en el problema en la zona exterior las condiciones de contorno y que éstas no se vean influenciadas por las geometría del propio vehículo; en el caso de que el volumen de aire no fuera lo suficientemente grande la geometría del modelo modificara el flujo en estas zonas generando un error en los resultados.

El paso siguiente es la discretización de este volumen de aire para lo que se han utilizado elementos tetraédricos lineales de Lagrange ya que permiten discretizar de forma relativamente simple el vehículo y optimizar el grado de aproximación en los resultados optimizando el coste computacional.

El primer paso de esta discretización es la discretización de las zonas interiores y exteriores del volumen. En estas superficies se han utilizado diversos tamaños de elemento dependiendo del tipo de zona [15, 16, 17], de las dimensiones de la zona y de la experiencia de discretización previa intentando que los elementos triangulares sean todo lo regulares y equiláteros posible pero intentando utilizar el mínimo número de elementos; con ello se intenta asegurar la convergencia y reducir el tiempo y los requerimientos de cálculo necesarios; por ello se ha utilizado un tamaño de arista de elemento de 6 mm en las diversas superficies del vehículo en general. Sin embargo en aquellas zonas donde se espera un mayor gradiente de velocidad del aire se ha utilizado un tamaño de lado de elemento mucho menor, al igual que en la zona de hueco de King-Pin y en las diversas mejoras; con ello se consigue un resultado más preciso para dichas zonas.

Tras la discretización de las superficies se ha generado la capa límite alrededor del vehículo mediante "boundary layers" [17]; este procedimiento permite la discretización de las zonas inmediatamente circundantes al vehículo y se ha seleccionado un tamaño inicial de elemento de 6 mm y con tres elementos en el espesor y un factor de crecimiento del tamaño de 1.2 [15, 16, 17]. Con ello se puede aproximar perfectamente la capa límite aunque genera un aumento considerable del número de elementos y del coste computacional; sin embargo resulta justificado y necesario para modelar este fenómeno y caracterizar la zona de aire inmediatamente circundante al vehículo. Para conocer el tamaño de la capa límite y el espesor de las "boundary layers" se realizó un análisis sobre el modelo original (ver figura 2 del material web adicional) con un tamaño de elemento de 0.2 mm que era lo suficientemente pequeño para obtener el comportamiento viscoso en la zona de la capa límite y mantener un $y^+ \approx 1$.

Tras ello se discretizó todo el aire restante iniciando la discretización en las zonas externas con un tamaño máximo de elemento de 100 mm ya que en dicha zona el aire se comporta linealmente y el flujo prácticamente no modifica su trayectoria ni su gradiente de velocidad. Por otro lado para la discretización del aire restante se utilizaron funciones de crecimiento de los elementos desde el vehículo a la zona exterior; para ello se estableció un tamaño máximo de elemento de 100 mm y un factor de crecimiento de 1.2 –el máximo recomendado por el programa– y se obtuvo una serie de discretizaciones con elementos prácticamente equiláteros (ver figura 3 del material web adicional)

Las diversas discretizaciones de los modelos obtenidos varían entre los 15 y los 20 millones de elementos.

Para verificar la independencia de los resultados y la discretización se realizó un análisis de la estabilidad frente al número de elementos con el modelo 1 de CAD y discretizaciones con 1, 5, 10, 20, 30 y 40 millones de elementos y se analizó el coeficiente de penetración aerodinámica, las presiones y las velocidades. Con ello se determinó que, a partir de 10 millones de elementos los resultados son independiente² de la discretización por lo que se han utilizado discretizaciones con más de 10 millones de elementos.

3.3. CÁLCULO AERODINÁMICO

3.3.1. Definición de las opciones de resolución

Se ha utilizado un modelo "segregado" –recomendado para este tipo de cálculos– ya que requiere un menor coste computacional sin afectar a la precisión; este modelo resuelve de forma independiente las ecuaciones de turbulencia y continuidad utilizando los resultados de la otra de la iteración previa. También se ha utilizado un modelo con doble precisión (recomendado para el cálculo aerodinámico en vehículo) [18, 19] para un análisis esta-

cionario basado en un cálculo nodal; todo ello lo recomienda la bibliografía y el programa para obtener los mejores resultados en este tipo de cálculos.

3.3.2. Definición del modelo de turbulencia

Se ha utilizado un modelo de turbulencia de tipo $k-\omega$ utilizando ecuaciones SST [18, 19] y un tratamiento de superficie de flujo no equilibrado [13, 7]. El uso de este tipo de modelo de turbulencia se debe principalmente a que es el más común y recomendado para el cálculo aerodinámico de vehículos y ofrece una relación óptima entre grado de aproximación y requerimientos computacionales [14]

Este modelo es de tipo semi empírico y las ecuaciones del modelo se derivan del estudio fenomenológico real y de los ensayos empíricos.

Para simular el comportamiento de las paredes se ha utilizado un modelo de pared mejorada que se recomienda para $y^+ \approx 1$ [7] donde el efecto de la viscosidad en las proximidades de la pared se resuelven mediante la capa viscosa

Este modelo resulta óptimo para los problemas estacionarios donde existe un amplio rango de turbulencia pero no puede utilizarse para análisis transitorios y que es incapaz de simular la anisotropía de las turbulencias y los flujos remolinados y los fenómenos con grandes turbulencias que aparecen en los momentos iniciales pero que desaparecen en los estados estacionarios. En este caso al estudiarse el estado estacionario con un amplio rango de turbulencia el modelo elegido resulta adecuado; si fuera necesario conocer el comportamiento en los instantes iniciales sería necesario utilizar otro modelo de turbulencia (como el modelo RSM)

3.3.3. Definición de las condiciones de contorno

Al existir diversas zonas se deben aplicar diferentes condiciones de contorno en cada una de ellas por lo que en la zona de entrada del aire se debe aplicar un flujo de aire constante (22 m/s / 80 Km/h) con una dirección perpendicular a la superficie y una turbulencia baja (0,1% de intensidad de la turbulencia); se ha utilizado este flujo ya que es el que representa de la forma más fidedigna al flujo en una carretera sin aire. En relación con la zona superior y en la zona lateral y posterior exterior del volumen de aire se ha simulado mediante una zona abierta con una presión de 1 atmósfera y un flujo de 22 m/s en la dirección adecuada.

El suelo se ha modelado como una superficie suave que se mueve a la misma velocidad que el aire a la entrada (80 Km/h) y que resulta coherente con la velocidad del vehículo [20]. Se ha utilizado esta velocidad ya que es el caso más común de velocidad de un vehículo articulado dedicado al transporte de larga distancia aunque los resultados y la modelización serían diferentes en los casos de aire frontal o lateral o en el caso de una velocidad mayor.

Se ha utilizado un modelo de medio vehículo con una condición de contorno de simetría para reducir el coste computacional mientras que se han considerado las superficies del vehículo como fijas sin fricción. Esto se debe a que la contribución de la fricción con el fluido representa menos del 10% de las fuerzas resistentes y su contribución implicaría un sustancial incremento del coste computacional e incluso podrían divergir los cálculos. Se debe resaltar que para establecer de forma adecuada esta fricción sería necesario realizar diversos ensayos experimentales para obtener los coeficientes de fricción que dependen principalmente de la rugosidad pero al analizarse en este artículo la dependencia en relación con la forma su contribución sería despreciable.

Se debe señalar finalmente que se ha utilizado para la resolución y la simulación una simplificación del problema asumiendo

un punto de vista relativo desde el vehículo que suele utilizarse en los cálculos aerodinámicos de vehículos.

3.3.4. Selección de las opciones para la resolución de las ecuaciones

Se ha utilizado un algoritmo de resolución de tipo Simple-C [7] para resolver el campo de presiones y de velocidades ya que resulta muy adecuado para discretizaciones con elementos no alineados con el flujo como es el caso. Adicionalmente se han utilizado ecuaciones de Segundo orden para el cálculo de momento y de la turbulencia y de primer orden para la presión. Estos son los parámetros recomendados por el programa para este tipo de cálculo.

Se debe indicar también que para mejorar la convergencia se han utilizado ecuaciones de primer orden para el cálculo del momento y la turbulencia durante las primeras 300 iteraciones y posteriormente se han modificado mediante ecuaciones de segundo orden.

Los criterios de convergencia para las simulaciones se han monitorizado permitiendo un error residual inferior a 10^{-4} y en el caso de las fuerzas de 10^{-6} [7]. En la tabla 1 del material web adicional se resumen estos ajustes computacionales.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer paso es el análisis del vehículo sin mejoras aerodinámicas para el hueco de King-pin para conocer las fuerzas y coeficientes de resistencia aerodinámicos así como los mapas de presión y velocidad.

Para analizar los resultados se han observado tanto las fuerzas como velocidades (magnitud y dirección), presiones, energía cinética, turbulencia, fuerzas de resistencia aerodinámica y coeficiente de penetración aerodinámico. Para analizar el consumo de combustible, se ha considerado una velocidad de 80 Km/h y, de acuerdo con algunos autores [8, 9 ,12], en estos casos la contribución de la aerodinámica es del 40% respecto de las pérdidas totales del vehículo, aunque depende del vehículo, velocidad, etc.

Analizando la tabla de resultados del coeficiente de resistencia aerodinámica (ver tabla 1) se puede observar que la mayor contribución se debe a las fuerzas generadas por la presión mientras que las fuerzas debidas a la viscosidad son inferiores al 5% pero no se podrían utilizar otros modelos de turbulencia más simples como el de Spalart-Allmaras o el laminar en el análisis.

conexiones de algunos circuitos como el eléctrico, el de frenos, etc., por lo que suele ser necesario rediseñar la zona.

Para el análisis de la influencia del coeficiente aerodinámico en la reducción del consumo de combustible se ha considerado que genera un 40% de reducción por lo que la reducción del consumo de combustible se obtiene multiplicando la mejora del coeficiente/fuerza resistente aerodinámica por 0.4.

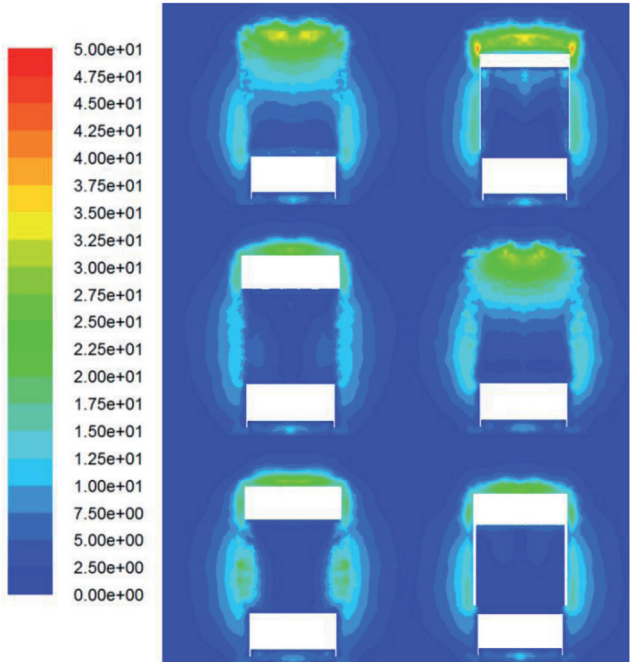


Fig. 2: Energía turbulenta (J) para un plano longitudinal colocado en el hueco de King-Pin: original (arriba-izquierda), con collar (arriba-derecha), con nariz aerodinámica (medio-izquierda), con trampas de vorticidad (medio-derecha), con trampas de vorticidad y nariz aerodinámica (abajo izquierda) y con collar y nariz aerodinámica (abajo-derecha)

Los modelos con nariz aerodinámica y collar permiten una reducción del coeficiente de penetración aerodinámica de un 5.65% y un 3.48% respectivamente pero son más simples de implementar y no es necesario rediseñar esa zona del vehículo. Se debe puntualizar ahora que las trampas de vorticidad están diseñadas para trabajar conjuntamente sólo con los spoilers laterales pero no con los del techo de la tractora, mientras que el collar está diseñado

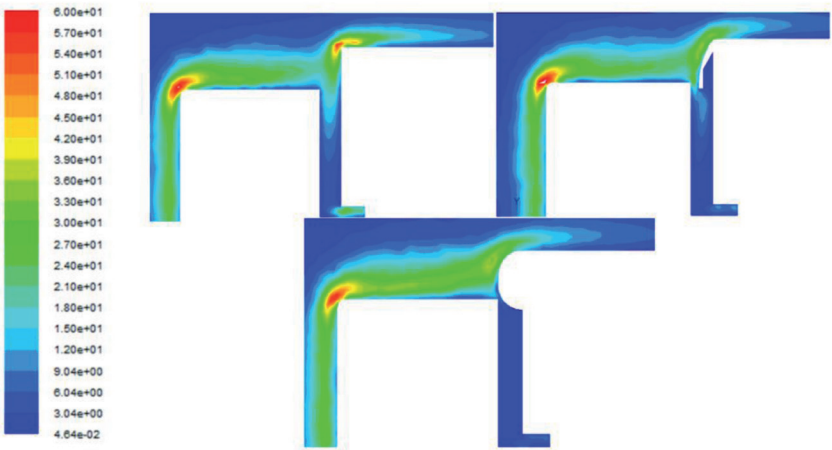
	Fuerzas Presion (N)	Fuerzas Visc (N)	Fuerza Total (N)	% mejora	% reducción consumo
Original	2792,38	141,92	2934,30	-----	-----
Con collar	2672,66	159,48	2832,14	3,48	1,39
Con Nariz Aerodinámica	2615,56	152,82	2768,38	5,65	2,26
Con Trampas de Vorticidad	2602,52	141,26	2743,78	6,49	2,60
Nariz Aerod + Trampas de vort	2526,00	156,60	2682,60	8,58	3,43
Collar + Nariz Aerodinámica	2550,00	154,96	2704,96	7,82	3,13

Tabla 1: Fuerza total y mejora del consumo de combustible para todos los modelos

Analizando los resultados para el modelo con trampas de vorticidad se puede apreciar una reducción del 6.48% en las fuerzas de resistencia aerodinámica que suponen aproximadamente una mejora en un 2.6% en el consumo de combustible; sin embargo se debe resaltar que la utilización de este tipo de mejora suponen una serie de inconvenientes ya que se sitúa en una zona del semirremolque complicada ya que en dicha zona se encuentran las

para trabajar conjuntamente con los dos por lo que su comportamiento local comparativamente es peor.

Se han estudiado dos modelos adicionales que resultan de la combinación de los anteriores: un modelo con trampas de vorticidad y narices aerodinámicas y un modelo con narices aerodinámicas y collares laterales. Es de esperar que de forma conjunta se obtenga un resultado global mejor, tal como se desprende de los



En el caso de las trampas de vorticidad los resultados de las ensayos de Wood y Steven [22] indican una reducción del consumo de combustible del 3.6%, similar a los resultados obtenidos.

El próximo paso del análisis es el ensayo de sensibilidad de dos mejoras aerodinámicas: la nariz aerodinámica y el collar lateral. Para ambas mejoras el mejor resultado se obtienen cuanto menor es el hueco de King-pin por lo que la longitud del dispositivo debe ser la máxima posible (es similar para la altura de la altura del collar lateral) pero existen otros parámetros involucrados que se han analizado y estudiado como el radio de curvatura de la nariz aerodinámica (R_{nc}) y el radio de curvatura del collar aerodinámico (R_{lc}) (ver figura 8 del material web adicional).

Fig. 3: Energía turbulenta (J) en el plano de simetría en la zona hueco de King-pin: original (arriba), con collar (medio) y con nariz aerodinámica (abajo)

Rnc (mm)	Rlc (mm)	Fuerza Presion (N)	Fuerza Viscos (N)	Fuerza Total (N)	% mejora	% mejora consumo
200	500	2526	156,6	2682,6	-----	-----
150	500	2588	162,3	2750,3	-2,52	-1,01
250	500	2503	153,4	2656,4	0,98	0,39
300	500	2567	158,3	2725,3	-1,59	-0,64
250	400	2534	159,3	2693,3	-0,40	-0,16
250	600	2489	151,9	2640,9	1,55	0,62
250	700	2567	158,9	2725,9	-1,61	-0,65

Tabla 2: análisis de sensibilidad para la nariz aerodinámica y el collar lateral

resultado que se muestran en la tabla 2 que indica que la primera combinación permite reducir el coeficiente de penetración aerodinámica en un 7.82 % mientras que el segundo en un 8.58.

Comparando la energía turbulenta para todos los modelos (ver figuras 4 y 5 del material web adicional y la figura 2) se puede observar que aparecen dos zonas con altas turbulencias situadas en la zona cercana al techo de la tractora y cercana al lateral.

Utilizando la nariz aerodinámica y el spoiler del techo se aprecia que se puede canalizar el flujo de aire para evitar esta zona turbulenta y que el flujo se convierta en uno altamente turbulento con grandes pérdidas aerodinámicas (ver figura 3). Con ello tal como se aprecian en las figuras 2 y 3 la energía turbulenta local disminuye para el hueco de King-pin lo que implica menores fuerzas resistentes y menor consumo de combustible.

El mismo fenómeno puede observarse en las figuras 2 y 3 del collar lateral y de las trampas de vorticidad.

Figura 2 muestra también pequeños vórtices atrapados en las trampas de vorticidad que actúan como una pared impidiendo que el resto del flujo entre y se transforme en flujo turbulento. Los otros dispositivos actúan gracias a su forma que permite reconducir el aire y reduciendo el hueco libre entre la tractora y el semirremolque. Analizando las figuras 3 y 6 del material web adicional que muestran la velocidad y dirección de las partículas de aire

La figura 7 del material web adicional muestra la energía turbulenta para las diversas configuraciones y se puede apreciar la elevada reducción de la turbulencia en la zona y la contribución de ambos dispositivos de forma conjunta. Comparando los resultados con los datos suministrados por la empresa NoseCone [10], un tráiler con collar lateral reduce el consumo de combustible en un 5% que es similar a los resultados obtenidos.

Se han realizado tres estudios diferentes con diferentes radios para cada mejora tal como la tabla 3 indica para optimizar los radios (estas variables son independientes entre si); inicialmente se ha modificado el radio de la nariz aerodinámica (R_{nc} ; inicial: 200) con otros valores (150, 250 y 300). Un radio muy pequeño (150) implica mayores modificaciones en la trayectoria del flujo de aire y mayores fuerzas resistentes por tanto. Por otro lado un radio muy grande implica que la nariz aerodinámica se comporta aproximadamente como un collar en el techo y decrece la influencia de la zona inferior de la nariz (al estar oculta tras la cabina) y por ello el comportamiento aerodinámico es peor. En el caso de un radio de 250 mm se obtiene el resultado óptimo con una mejora del 0.39% en el consumo de combustible.

En relación con el collar lateral (R_{lc} ; inicial: 500), un radio menor (400) implica grandes modificaciones en el flujo de aire y grandes pérdidas aerodinámicas. Por otro lado radios demasiado altos (700) implican la aparición de un hueco entre la cabina y el semirremolque ya que la anchura del semirremolque es mayor que la de la tractora y el collar no puede cubrir este hueco. En este caso el mejor resultado se obtiene con un valor de 600 mm (0.62 % de mejora del consumo).

5. CONCLUSIONES

Siguiendo con el análisis detallado de los resultados y la metodología implementada, una conclusión obtenida es que los programas CFD son herramientas muy útiles para analizar modificaciones aerodinámicas y mejoras en vehículos con un coste bajo y que permiten obtener resultados satisfactorios en poco tiempo.

Por otro lado existe un amplio campo de investigación y un gran número de dispositivos aerodinámicos que permiten mejorar considerablemente la eficiencia de los vehículos y que deberían estudiarse más en profundidad y aplicarse a los vehículos pesados ya que es uno de los campos de investigación más prometedores para reducir el consumo en vehículos pesados

Se debe indicar que el coeficiente de resistencia aerodinámica puede reducirse considerablemente sin necesidad de modificar los vehículos ya existentes y, únicamente mediante la colocación de dispositivos exteriores que no suponen una penalización sustancial en el peso ni un elevado coste ni grandes requerimientos estructurales se puede reducir considerablemente el consumo de combustible y aumentar la eficiencia del vehículo.

En relación con las mejoras introducidas y estudiadas en este artículo, en todos los casos de mejoras para el hueco de King-pin se ha demostrado un beneficio, un aumento de la eficiencia, una reducción del C_x y una reducción del coeficiente de penetración aerodinámica pero se debe indicar como desventaja la mala accesibilidad de la zona del hueco de King-pin. Estos beneficios dependen también del tipo de vehículo y de su geometría y serán diferentes para cada vehículo por lo que sería recomendable un estudio pormenorizado.

Se ha analizado el aspecto económico con un precio del litro de combustible de 1.0 €/l (06/02/2016), un consumo medio del vehículo de 38 l/100 Km y recorriendo aproximado anual de 200.000 Km; con ello se obtiene un consumo anual de 76.000 litros y un coste de 76.000 €/año lo que supondría con la configuración óptima de mejoras una reducción de 2.400 €/año. Se debe indicar en este apartado que el consumo medio y el ahorro dependen de muchos factores (geometría, velocidad de conducción, factores externos, etc.) por lo que puede suponer por ejemplo un 10% del consumo en vehículos con velocidades medias bajas y un 50% en el caso de semirremolques que habitualmente circulan por autovía o autopista. También existe un beneficio medioambiental ya que la implementación de estos dispositivos puede reducir las emisiones de CO₂ en 5.4 Toneladas al año.

Finalmente indicar que la principal contribución de este artículo es el análisis de mejoras aerodinámicas para una zona del vehículo articulado en la que apenas se han realizado estudios ni análisis pero para la que existen ya algunas mejoras comerciales aunque no existen datos de su comportamiento; por otro lado se ha mostrado como con una adecuada optimización de los parámetros geométricos se puede aumentar la mejora obtenida.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hucho W. "Aerodynamics of road vehicles." Butterworths. London. 1987. ISBN-13: 978-0768000290
- [2] Vera C, Aparicio F, Díaz, V. "Teoría de los vehículos automóviles". 2001. ETS Ingenieros Industriales.
- [3] Morelli A. "A new aerodynamic approach to advanced automobile basic shapes". SAE Technical Paper n° 2000-01-0491. 2000, p.104, Report. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2000-01-0491>
- [4] Wood RM, Bauer SXS. "Simple and low cost aerodynamic drag reduction devices for tractor-trailer trucks". SAE Paper n° 2003-01-3377. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2003-01-3377>
- [5] Bachman LJ, ERB A, Bynum CL. "Effect of single wide tires and trailer aerodynamics on fuel economy and NOx emissions of class 8 line-haul tractor". SAE Paper n°05CV45. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2005-01-3551>
- [6] Rutledge WH, Polansky GF, Clark EL "Aerodynamic design and performance of a bent-axis geometry vehicle". Journal of Spacecraft and Rockets. August 1988. Vol 25-4. p. 257. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/3.25997>
- [7]. Miralbes R, Castejon L. "Aerodynamic Analysis of a Vehicle Tanker". Journal of Fluids Engineering. April 2009. Vol 131. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3077135>

- [8] Miralbes R. "Aerodynamic analysis of some vortex generator improvements for heavy vehicles". International Journal of Heavy Vehicle Systems. 2012. Vol 19-4. p.355-370. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJHVS.2012.049847>
- [9] Miralbes R, Castejon L. "Aerodynamic analysis of some boat tails for heavy vehicles". International Journal of Heavy Vehicle Systems. 2012. Vol 19-2. p.115-127. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJHVS.2012.046830>
- [10] <http://www.nosecone.com/aeavan.htm>
- [11] Wood RM. "Cross flow vortex trap device and method for reducing the aerodynamic drag of ground vehicles". US Patent 6986544. August 2004.
- [12] Saiz V. "estudi i simulació aerodinàmica del roadster FS1". UPC, Escola Tècnica d'Enginyers Industrials de Barcelona, 2005.
- [13] Canet JM, Bugeda G, Oñate E. "Simulación numérica de la aerodinámica de vehículos". Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Ed. CIMNE. 1991. ISBN: 84-404-8685-5
- [14] "FLUENT 6.2 DOCUMENTATION, User's Guide". Fluent INC. 2004.
- [15] Katz J. "Aerodynamics of race cars". Annual Review of Fluid Mechanics. 2006. Vol. 38. p.27-63. DOI: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016>
- [16] Soso MD, Wilson PA. "The influence of an upstream diffuser on a downstream wing in ground effect". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering. Part D: Journal of Automotive Engineering. 2008. Vol. 22. P.551-563. DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/09544070JAUTO284>
- [17] Dad-el-Hak M, Bushnell DM. "Separation control: review". Journal of Fluids Engineering. 1991. Vol 113. p.5-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2926497>
- [18] Parneix S, Durbin PA, Behnia M. "Computation of 3-D turbulent boundary layer using theV2 model". Flow Turbulence and Combustion Journal. 1998. Vol. 60. p.19-46. DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009986925097>
- [19] Menter FR. "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications". AIAA Journal. 1994. Vol 32. p.269-289. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/3.12149>
- [20] Durbin PA. "Near-wall turbulence closure modelling without 'damping functions' ". Theory Computational. Fluid Dynamics. 1991. Vol 3. p.1-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00271513>
- [21] Wood RM, Bauer S. "Simple and Low-Cost Aerodynamic Drag Reduction Devices for Tractor-Trailer Trucks". SAE Technical paper 2003-01-3377. 2003.

AGRADECIMIENTOS

La publicación de este artículo de investigación ha sido posible gracias a los fondos obtenidos del Departamento de Industria e Innovación del Gobierno Aragón así como de los Fondos Sociales Europeos y del grupo de Investigación GEDiX de la Universidad de Zaragoza, de acuerdo con la normativa (CE) n° 1828/2006. de la comisión del 8 de diciembre.

MATERIAL WEB ADICIONAL

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/7666_1.pdf

