

Ensayos experimentales a escala real de generadores de vorticidad para reducir el coeficiente aerodinámico en vehículos pesados



Experimental full scale tests on vortex generators for heavy vehicles drag reduction



Ramon Miralbes-Buil, David Ranz-Angulo, Juan-Antonio Peña-Baquedano

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Dpto. de Ingeniería de Diseño y Fabricación. Calle María de Luna, s/n - 50018 Zaragoza. Tfno: +34 876 765069

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8321> | Recibido: 22/02/2017 • Evaluado: 27/02/2017 • Aceptado: 27/06/2017

ABSTRACT

- This article details the analysis of experimental tests regarding the behavior of some vortex generators (VGs) for heavy vehicles. The correlation between numerical and experimental tests, including road tests, smoke and water jet tests, etc. will be highlighted.
- Two types of vortex generators have been tested, from which high decreases in the drag coefficient in the virtual tests by means of CFD tools were obtained. These vortex generators, are one co-rotational with blade shape VG and the other one with a complex geometry, manufactured by the Air Tab Company. On the other hand, some new low-cost experimental tests have been planned. They do not include the use of a wind tunnel. It has also been necessary to build some functional prototypes of the VGs. It must be highlighted that the use of these types of tests stems from the need to obtain experimental test results to be compared with the numerical results. It must also be pointed out that, due to their high costs, wind tunnel tests have not been conducted to validate the numerical results. However, road test results have proved useful in obtaining the behavior and aerodynamic improvements of the VGs.
- **Keywords:** vortex generators, aerodynamic, heavy vehicle, articulated, experimental, trailer.

obtener el comportamiento real y la mejora aerodinámica de los diversos generadores de vorticidad.

Palabras clave: generador de vorticidad, aerodinámica, vehículo articulado pesado, experimental, tráiler.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, diversos factores como el precio del petróleo, el efecto invernadero y el uso de energías no renovables, por nombrar los más importantes, están teniendo un impacto importante en el sector de la automoción que se está transformando para producir vehículos más eficientes energéticamente y menos contaminantes. Para ello ha sido necesario modificar los criterios de diseño de los vehículos así como desarrollar nuevas técnicas para generar y ensayar el comportamiento de estos diseños. La aerodinámica y el diseño aerodinámico de vehículos permite modificar y optimizar el comportamiento del vehículo en relación a la energía que consume simplemente modificando el diseño exterior, el acabado de las superficies, añadiendo mejoras aerodinámicas y disminuyendo la tolerancia y los huecos entre los diversos componentes de la carrocería del vehículo, por nombrar alguna de las principales estrategias de diseño.

Durante los últimos años se han producido importantes modificaciones en el diseño exterior de los vehículos con el objetivo de reducir tanto el área frontal del vehículo como su coeficiente aerodinámico; se han reemplazado las formas rectas con nuevas formas sinuosas y perfiles más estilizados tal como indica Morrelli (2000) [1] en su artículo. Esta tendencia en el diseño es el resultado de la aplicación de criterios estrictos de eficiencia y medioambientales ya que, aproximadamente la mitad de la energía utilizada para mover un vehículo se utiliza para contrarrestar las fuerzas aerodinámicas. Es por ello que por sí misma, la aerodinámica es una de las mejores formas de aumentar la eficiencia de los vehículos y superar el obstáculo invisible que supone la atmósfera.

Los estudios de Wood y Bauer (2003) [2] indican que, en los últimos treinta años, el coeficiente aerodinámico de los vehículos más aerodinámicos se ha reducido hasta en un 40% lo que ha supuesto una reducción del consumo de combustible del 19%; en el caso de los vehículos pesados, tal como indican los estudios de Velury et Al. [3], la energía utilizada por el vehículo para compensar las pérdidas aerodinámicas depende principalmente de la velocidad del vehículo; para los vehículos pesados se estima que alrededor de un tercio de la energía consumida se debe a las pérdidas aerodinámicas del vehículo.

RESUMEN

El objetivo de este artículo es el análisis experimental del comportamiento de diversos generadores de vorticidad (VG) existentes en el mercado utilizando herramientas experimentales como ensayos en ruta, ensayos de chorro de agua, etc. y su correlación numérico-experimental.

Se han comparado dos tipologías diferentes de generadores de velocidad en las que se han obtenido altas reducciones en el coeficiente de penetración aerodinámica utilizando herramientas virtuales CFD. Estos generadores de vorticidad son por un lado uno co-rotacionales con forma de aleta y otro con forma compleja de la empresa AirTab.

Por otro lado se han desarrollado diversos ensayos experimentales de bajo coste para evitar el uso del costoso túnel de viento y se han desarrollado diversos prototipos funcionales utilizando la tecnología de la impresión en 3D. Se debe indicar que, debido al alto coste del túnel de viento ha sido imposible realizar este tipo de ensayo pero se han realizado ensayos reales en ruta para

Es por ello que resulta esencial para el desarrollo de vehículos más eficientes la mejora de la aerodinámica en los vehículos pesados que pueden permitir hasta un 15% de reducción de consumo de combustible y, por tanto, de emisiones contaminantes.

Actualmente existen diversas mejoras aerodinámicas e investigaciones que han generado algunos dispositivos (tanto comerciales como sólo patentados) para vehículos articulados como las narices aerodinámicas o *nosecones* (NOSECONE tm Company) [4] (para reducir las pérdidas aerodinámicas en el hueco del *King-pin*), las colas de barco o *boat tails* (para la zona posterior del vehículo y que fueron estudiadas por Visser (2005)[5]), los faldones aerodinámicos o "*under-skirt*" y el uso de generadores de vorticidad o "*vortex generators*" (utilizados tanto en el hueco de King-Pin como en la zona posterior del vehículo). Sin embargo, estas mejoras, tal como indica el IRTE [6], en muchas ocasiones no han sido ensayadas ni verificadas y en muchos casos se ha realizado sólo algún tipo de ensayo que puede resultar insuficiente. Los ensayos más habituales son ensayos en carretera, ensayos de prototipos a escala en túnel de viento y ensayos mediante técnicas numéricas utilizando herramientas CFD (*Computer-aided Fluid Design*).

Esto se debe a que, por un lado los ensayos reales en carretera resultan costosos ya que se debe fabricar un prototipo real y generalmente no aportan una gran cantidad de datos útiles al ingeniero que permita optimizar el vehículo. En el caso del uso de herramientas CFD, éstas aportan una gran cantidad de datos (líneas de flujo, presiones, turbulencia, velocidad de las partículas, etc.) por lo que resultan más útiles para los ingenieros. Sin embargo, estos modelos numéricos y ensayos deben ser validados mediante ensayos reales, tal como indica Chowdhury, Moria, Ali, et al. (2012) [7]. El túnel de viento es la mejor alternativa para la validación de los modelos numéricos ya que es posible controlar de forma adecuada las condiciones de contorno del ensayo y la velocidad de flujo. Esto se debe a que, generalmente, se utilizan condiciones de contorno en los ensayos numéricos similares a las que posteriormente existirán en el túnel de viento que, sin embargo, no existen en un ensayo de carretera donde no existe control sobre las mismas. Cheli, et al. (2011) [8] indicaron que, aunque los ensayos a escala en túnel de viento resultan útiles para validar un modelo numérico, los resultados no eran totalmente idénticos y aparecían ciertas discrepancias, por lo que el método más adecuado es un ensayo a escala real. Por otro lado, los ensayos en túnel de viento (especialmente a escala real) son demasiado costosos, tanto por el coste de la instalación como del prototipo a ensayar como de la energía consumida durante el ensayo y, por otro lado, estas instalaciones son incapaces de simular adecuadamente el comportamiento del movimiento de las ruedas sobre el asfalto y el efecto suelo que se genera en los bajos de un vehículo, tal como indica Soderblom, Lofdahl, E., et al. (2009) [9].

El objetivo de este artículo es comparar los datos existentes obtenidos de ensayos de carretera con los ensayos numéricos del artículo "*Aerodynamic Analysis of Some Vortex Generator Improvements for Heavy Vehicles*" de Miralbés (2012) [10], con el objetivo de validar el comportamiento aerodinámico de los generadores de vorticidad (VGs) estudiados.

VGs son elementos que modifican el flujo de aire en determinadas zonas del vehículo donde existe un flujo turbulento incontrolado para conseguir un cierto control sobre el mismo. Los principales tipos de VGs son de tipo co-rotacional y rectangular de tipo aleta y han sido estudiados en muchos artículos tanto numérica como experimentalmente, entre los que quizás se debe mencionar a Zamorano-Rey, G. et al. [11]. Este estudio compara el comportamiento numérico, utilizando herramientas CFD, y expe-

rimental de los VGs anteriormente descritos con diversos ángulos de incidencia del viento (12.5° y 18°). Los resultados muestran un alto grado de correlación entre los resultados experimentales y numéricos de los que se deduce que, mediante esta herramienta, es posible predecir el comportamiento de los VGs.

Los VGs se han utilizado en otros campos como el control del flujo de aire en las alas de los aviones y en los nuevos aerogeneradores para monitorizar la turbulencia en las palas y conseguir una reducción de los costes de mantenimiento, tal como indica Aramendia-Iradi, I. et al. [12].

Un objetivo secundario de este artículo es el análisis de metodologías de ensayos experimentales con el objetivo de desarrollar una metodología de ensayo más económica con la que obtener el comportamiento aerodinámico utilizando una combinación de herramientas numéricas y experimentales; se debe indicar que resulta muy recomendable adicionalmente realizar correlaciones en el túnel de viento pero que, debido al coste, resulta disuasorio.

En resumen, el objetivo principal es la obtención del comportamiento real de los VGs estudiados previamente de forma numérica y la comparativa de ambos métodos y sus resultados; además, se ha realizado comparación de los resultados obtenidos con los obtenidos por otras fuentes que se van a comentar en el artículo.

En el artículo "*Aerodynamic Analysis of Some Vortex Generator Improvements for Heavy Vehicles*" de Miralbés [10], se utilizaron herramientas CFD para analizar y diseñar generadores de vorticidad para vehículos pesados tanto de tipo tráiler como de tipo rígido de caja cerrada. Se estudiaron VGs de tipo "*Sub-boundary layer*" (menor altura que la capa límite) con diversas configuraciones (ver Figura 1 y 2): co-rotacional (modelo 1), contra-rotacional (modelo 2), configuración alternada entre co y contra rotacional (modelo 3), así como los VGs de la compañía Air Tab (modelo 4). El modelo alternante es similar al utilizado por Fernández, U., et al [13] en sus estudios.

Los resultados numéricos muestran que los modelos con el mejor comportamiento (ver Figura 3) son el modelo 4 o VG de Air Tab (9.46% de mejora en el coeficiente Cd) y el modelo 1 o co-rotacional (12.46%).

En este artículo, las zonas con las mayores pérdidas aerodinámicas han sido determinadas analizando los resultados del flujo de aire y partículas, así como la velocidad de las mismas y la energía turbulenta y el tipo de flujo (laminar/turbulento). Se ha observado, tal como indica Miralbés y Castejón (2009) [14], que las zonas con mayor turbulencia aparecen en la parte inferior del vehículo, en la zona de las ruedas, en la parte posterior del vehículo y en el frontal del mismo. En el caso particular de los vehículos articulados, aparece adicionalmente en el hueco del King-pin o de la quinta rueda, que es el hueco entre la cabina tractora y el semirremolque; en esta zona se produce un estancamiento del aire debido a la discontinuidad en la carrocería.

Los ensayos numéricos se realizaron utilizando el *software* comercial de CFD FLUENT con el pre-procesador GAMBIT. Sin embargo, los mismos resultados se podrían haber obtenido con el mismo nivel de precisión utilizando herramientas de *software* libre, tal como indica Ambrosinol and Funnell (2006) [15] con el mismo coste computacional. Otros estudios como el de Zamorano-Rey, G. et al. [11] también utilizaban el *software* Open Foam con un alto grado de precisión.

Los estudios mencionados utilizaban una malla con elementos de tipo Lagrangiano y, para simular la capa límite (con un espesor de 23 mm) se utilizaron elementos de tipo cuña o "*wedge*" con un tamaño inicial de 6 mm y 3 elementos en el espesor por lo que se utilizó un factor de crecimiento de 1.05. El resto de la discretiza-

ción se realizó mediante elementos de tipo tetraédrico utilizando una función de crecimiento de 1.2 y un tamaño máximo de elemento de 200 mm.

Se ha utilizado modelo de solución segregada con un modelo de turbulencia basado en el modelo $k-\epsilon$ con ecuaciones RANS. En el caso de las paredes, se ha utilizado ecuaciones no equilibradas para simularlas y el algoritmo de resolución Simple-C. Se realizó adicionalmente un estudio para analizar la independencia de la discretización en los resultados. Para ello se utilizaron seis tipos diferentes de discretizaciones con el modelo VG 1 (con 1, 5, 10, 20, 30 y 40 millones de elementos) donde se analizó el coeficiente de arrastre C_d y el de sustentación, las presiones, flujos de partículas, energía turbulenta, etc. A partir de los resultados se concluyó que con el modelo con 10 millones de elementos, los resultados eran independientes de la discretización.

La Figura 4 muestra un esquema del modelo 1 de VG de tipo co-rotacional, así como sus dimensiones; estos VGs debe instalarse distanciados entre sí 80 mm y con una inclinación respecto al flujo de aire de 15° .

Los VGs de tipo co-rotacional son, como se ha comentado, de tipo aleta rectangular y fueron estudiados por Lin, 2002 [16] que estableció las principales dimensiones de los mismos; por otro lado Kuya, Y.; Takeda, K.; Zhang, X.; Beeton, S.; Pandaleon, T. [17] estudiaron su comportamiento en vehículos de competición. En relación con la altura del VG (h_{vg}) se ha utilizado una altura de 20 mm, ligeramente inferior a la altura de la capa límite (previamente determinada), con una separación entre los mismos de 80 mm (4 veces h_{vg}). La relación entre altura y longitud se ha fijado en 1:4 y el ángulo de instalación se ha fijado en 15° (todos estos parámetros se han determinado en base al estudio bibliográfico).

Debe señalarse en este punto que existen estudios como el de Fernandez-Gamiz, G., et al. [18] sobre sub boundary layer VGs que establecen una altura optima de un 40% de la altura de la capa límite. Este aspecto resulta interesante por lo que se plantea como una futura línea de investigación.

Adicionalmente existen ensayos previos de la empresa Air Tab y del Instituto MIRA utilizados para comparar el comportamiento de este tipo de vehículos, con y sin generadores de vorticidad que se van a resumir en esta sección.

El instituto MISA (*Motor Industry Research Association*) llevó a cabo dos ensayos a alta velocidad, tal como indica el informe *Air tabs™ Vortex Generators Technical Trials Articulated HGV* [7], utilizando un tráiler de 28 Tn que tenía instalado el VG Air Tab únicamente en la zona anterior al hueco de la quinta rueda y se comparó con un vehículo idéntico sin VGs.

El instituto MISA utilizó una pista de alta velocidad circular de 4.55 Km de longitud con diversos carriles de 40 mph, 50 mph y de alta velocidad completamente peraltada. Para cada ensayo se utilizaron dos conductores diferentes y se precalentó el motor antes del ensayo, al igual que se midió la cantidad y temperatura de combustible. Tras ello cada conductor realizó el mismo ensayo con y sin VGs, que consistía en recorrer 15 vueltas, 5 a 40 mph, 5 a 50 mph y 5 a 55 mph, por lo que se conseguía una velocidad media de 76 Km/h. Tal como indica la Figura 5, se aprecia una reducción del consumo de combustible del 1,53% y del 1,81% dependiendo del conductor.

Otro ensayo interesante aparece reflejado en el artículo "*Lockheed Georgia Low Speed Wind Tunnel Honda Civic Hatchback Air Tab Modification Results*" [19], que fue realizado en el túnel de viento baja velocidad de Lockheed en el estado de Georgia (EEUU). El objetivo del autor era confirmar que el uso de generadores de vorticidad permitía aumentar el efecto suelo en la base de un ve-

hículo en movimiento que utilizara VG en la parte posterior, así como reducir el consumo de combustible. Para ello, utilizando un túnel de viento con viento a velocidad constante (55 mph/88 Km/h) y, utilizando una serie de ángulos de instalación de los VG en un Honda Civic Hatchback de 1982, se obtuvo el ángulo idóneo de los VGs. Se ha seleccionado este artículo en particular por dos razones: el vehículo que se utilizó tenía el área transversal lo suficientemente pequeña para que las paredes del túnel de viento no afectaran a los resultados (que invalidarían los resultados debido a modificaciones en el tipo de flujo) y a que poseía una base suficientemente plana en la parte del maletero para albergar sensores de presión para medir la presión en cada ensayo localizados en la zona posterior del vehículo. El vehículo se fijó al suelo sobre sensores de carga para obtener el coeficiente de arrastre y de sustentación (a partir de las fuerzas), se instalaron 50 sensores de presión a lo largo de vehículo y sobre un suelo giratorio que permitía ensayar ángulos del viento de entre -4 y 30° .

Los resultados mostraron que el uso de *Air Tab* reduce el coeficiente de arrastre (C_d) para cualquier ángulo de instalación pero que aumenta con ángulos mayores (ver Figura 6); por otro lado, los sensores de presión demostraron una reducción de la presión circundante para todos los sensores y casos en los que se utilizaron VGs. En relación con las pérdidas aerodinámicas, el ensayo demostró que la potencia requerida para mantener una velocidad de 55 mph caía de 9.79 a 9.38 CV, lo que supone una reducción de 0.41 CV o un 4%. Se debe señalar que para este ensayo se omitió el uso de Air Tabs en la zona posterior de la capota para obtener resultados simétricos. Es por ello que, con una extrapolación conservadora de estos resultados y con los VGs montados en el techo aumentaría la mejora un 50% lo que se traduciría en una reducción adicional del 2% en la potencia requerida y, en conjunto, en una reducción del 6% del consumo de combustible.

Otro ensayo interesante llevado a cabo en un túnel de viento aparece en la Figura 7 en la que, uno vehículo a escala de tipo semirremolque con y sin VGs en el hueco de la quinta rueda se desplaza dentro de un entorno con humo para comparar visualmente el comportamiento y la irrupción de humo en el hueco. Tal como se aprecia en la Figura 7 en el modelo sin VGs (izquierda) aparece una mayor cantidad de humo que con VGs (derecha) lo que demuestra que, mediante el uso de VGs se reduce la cantidad de aire que penetra en el hueco de la quinta rueda y ejerce un efecto de succión, generando finalmente pérdidas aerodinámicas en esta zona.

Existe una evidencia adicional del uso de generadores de vorticidad, tal como indica Air Tab en su página web, en la que presenta evidencias de reducción en el consumo de combustible con el uso de este tipo de VGs de entre el 2 y el 5% dependiendo del vehículo, así como un aumento de la estabilidad, debido a la reducción de flujos turbulentos que puede generar una mayor tendencia al vuelco. De la misma forma aparecen menores fuerzas transversales en caso de viento cruzado y se generan menores proyecciones de agua hacia otros vehículos en caso de lluvia o nieve. También se genera un flujo turbulento menor por lo que la visibilidad para el resto de vehículos mejora e incluso para el propio vehículo pesado.

Los resultados son para VGs instalados en dos localizaciones del vehículo pesado: en el hueco de la quinta rueda y en la zona posterior de la caja; cabe señalar que, la primera localización en sólo válida para vehículos articulados mientras que la segunda puede utilizarse para gran cantidad de vehículos como caravanas, furgones y furgonetas, autobuses, etc.

Otro estudio interesante es el presentado por Ken Slaughter [20], realizado mediante un semirremolque con y sin VGs de Air

Tab que indicaban una reducción del consumo de combustible de 22-23 MPG a 21-22 MPG (4-5%).

2. MATERIALES AND MÉTODOS

El principal objetivo de los ensayos experimentales es la obtención del comportamiento en un ambiente real de los VGs así como comparar los resultados obtenidos mediante diversos métodos. Se debe indicar que, aunque los modelos numéricos y los prototipos utilizados en los túneles de viento son similares, no son exactamente idénticos a los vehículos reales (esto se debe a que, habitualmente, los limpiaparabrisas, espejos retrovisores, estructura del suelo del vehículo, rotación de las ruedas, etc. no se incluyen). Es por ello que, aunque los resultados de estos test son similares a los reales, no son iguales ya que no incluye estos elementos.

Se debe indicar que cualquier ensayo numérico, especialmente en el ámbito aerodinámico, debe siempre validarse mediante el uso de un túnel de viento. En este sentido el túnel de viento presenta diversas desventajas ya que en muchas ocasiones es difícil ensayar modelos a escala real debido a las dimensiones y potencia requeridas del túnel de viento. Es por ello que, como ocurre con los vehículos pesados, se deben generar modelos a escala normalmente funcionales, lo que supone un elevado coste tanto monetario como temporal. Por otro lado, algunos comportamientos aerodinámicos locales son difíciles de reproducir mediante modelos a escala (como el uso efecto de la rotación de las ruedas o el efecto suelo) y mediante el uso del túnel de viento donde se generan unas condiciones de contorno ideales; sin embargo, los ensayos de carretera presentan también ciertas desventajas debidas a la falta de control sobre las condiciones del ensayo (velocidad, condiciones del tráfico, temperatura, presión atmosférica, etc.), por lo que la repetitividad resulta complicada. Es por ello que, debido a estas limitaciones, el uso de análisis numéricos mediante herramientas CFD en determinadas fases del diseño resulta fundamental ya que permite de forma sencilla y económica obtener el comportamiento aerodinámico y optimizar el diseño mediante diversas iteraciones. Es por ello que, aunque debe ser validado experimentalmente (habitualmente el diseño inicial y final), la utilización de herramientas numéricas es la herramienta óptima para la mejora aerodinámica de vehículos pesados.

En este artículo se han desarrollado dos tipos de ensayos reales en carretera utilizando por un lado un vehículo de tipo turismo y por otro lado un furgón de carga en los que se han instalado diversos VGs, algunos de los cuales como los co rotacionales han tenido que ser prototipados.

Para realizar el ensayo fue necesario seleccionar vehículos de referencia por lo que se seleccionó un turismo con una sección transversal similar al Honda Civic utilizado en los ensayos de Lockheed y un furgón con una forma similar en la zona posterior a un semirremolque de caja cuadrada.

Para ambos tipos de ensayo es necesario controlar la velocidad del vehículo utilizando el control de crucero y el monitorizado mediante un dispositivo GPS. Adicionalmente se han controlado mediante una estación meteorológica los parámetros ambientales con mayor influencia como la velocidad y dirección del viento, la presión atmosférica, etc.

La influencia de las condiciones atmosféricas puede minimizarse mediante la planificación de los ensayos durante épocas de buen tiempo en días consecutivos y, para evitar la influencia de la temperatura se recomienda realizar los ensayos a la misma hora en días consecutivos y en épocas del año con escasos cambios climáticos y de tiempo soleado sin viento.

Durante el ensayo debe utilizarse el mismo vehículo con el mismo peso y la misma cantidad y tipo de combustible; es por ello que se recomienda el repostaje completo antes de cada ensayo y la verificación de pesos y, si fuera necesario, el lastrado. Adicionalmente debe verificarse la presión de las ruedas y, para evitar la influencia de un motor frío debe precalentarse durante unos 30 minutos mediante conducción del vehículo.

Otro aspecto importante para la realización del ensayo es la selección del recorrido; es por ello que se debe seleccionar una vía de alta capacidad (autovía o autopista) con poco tráfico y con pequeñas variaciones en la orografía.

Finalmente los resultados que deben obtenerse son el consumo de combustible promedio, la velocidad, el tiempo del recorrido y los datos meteorológicos.

3. RESULTADOS

3.1. ENSAYO DE CARRETERA UTILIZANDO UN VEHÍCULO DE TIPO TURISMO

El primer ensayo realizado ha sido mediante un turismo similar al Honda Civic utilizado en los ensayos de Lockheed.

Para realizar el ensayo se ha seleccionado un vehículo con ordenador de a bordo y control de crucero; adicionalmente se han monitorizado en tiempo real diversas variables como el consumo instantáneo, el consumo total, la distancia recorrida, la velocidad promedio e instantánea y el tiempo utilizado. El vehículo seleccionado, contaba con un control de crucero equipado que permitía mantener una velocidad constante con una precisión de ± 2 Km/h.

El vehículo seleccionado fue un Renault Megane CC (ver Figura 8) sin spoilers en la parte trasera donde la geometría cambia de forma abrupta. Este vehículo tiene unas dimensiones y un área transversal similares al Honda Civic de los ensayos experimentales.

Para seleccionar la ruta del ensayo se han utilizado los siguientes requisitos: una vía de alta capacidad como una autovía o una autopista, orográficamente plana y con poca densidad de tráfico para evitar la influencia del mismo. El tramo seleccionado debe ser de unos 60 Km para ser recorrido en unos 30-40 minutos. Se utilizó tanto el tramo de ida como el de vuelta.

Durante el ensayo, el control de crucero se fijó en 120 Km/h para minimizar la influencia del conductor en la repetitividad.

A partir de estas restricciones, se seleccionó un tramo de autovía de la red nacional española, seleccionando un punto concreto y un punto final de ensayo (indicados mediante una señal de tráfico). Antes del ensayo se precalentó el vehículo durante 50 Km. El ensayo se inició con el vehículo en velocidad de crucero y se reseteó el ordenador de a bordo en el punto designado. Se realizaron 18 ensayos (3 días x 3 viajes x 2 direcciones) en días sucesivos. Durante el mismo día el vehículo se ensayó con y sin VGs para que las condiciones atmosféricas fueran similares (temperatura, presión, dirección y velocidad del viento, etc. que fueron monitorizados mediante una estación meteorológica y el sensor de temperatura del vehículo).

Para la selección de los días de ensayo se utilizó la previsión meteorológica de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Se seleccionaron varias semanas en primavera (mayo) para realizar los ensayos, en las cuales el tiempo era soleado, con una temperatura de 25-30°, bajo viento y presión atmosférica constante. Con ello se minimiza la influencia ambiental en los resultados.

Los resultados se muestran en la tabla III donde se produce una mejora del 1,76% en el consumo de combustible para el ensayo del AirTAB y del 3,12 % para el caso del modelo 1, un VG co rotacional.

Se debe señalar que para la instalación se utilizaron las recomendaciones de Air Tab [21].

Uno de los resultados obtenidos fue el consumo de combustible en cada viaje tanto de ida como de vuelta y debe señalarse que el existe una tolerancia en la precisión de $\pm 0,1$ L. Por otro lado se observó que, bajo condiciones similares de tráfico, el vehículo mejoraba su comportamiento siempre con el uso de VG, especialmente con el VG co rotacional.

3.2. ENSAYO DE CARRETERA UTILIZANDO UN VEHÍCULO DE TIPO FURGÓN

El objetivo de este test es la correlación experimental de un vehículo similar en su parte trasera a un semirremolque de caja cuadrada con VGs instalados en la parte posterior del mismo. Por ello se utilizó un furgón con caja cuadrada, en concreto un IVECO DAILY de 10 m³ (ver Figura 9) que fue alquilado y sobre el que se fijaron los VGs de forma parecida a cómo se fijaron en el turismo. Este vehículo contaba también con ordenador de a bordo y control de crucero y se equipó con un GPS portátil como en el ensayo de la sección 3.1.

El ensayo realizado es similar al descrito en la sección 3.1 (ruta, tiempo, condiciones climáticas, época, etc.) per se realizó por la tipología de vehículo a una velocidad de 100 Km/h.

Tal como se aprecia en la Figura 10 se produce una mejora en el consumo de combustible del 1.74% mediante el uso de los VGs de Air Tab y del 3.74% mediante el uso del modelo 1 o co-rotacional (estos resultados son el promedio de 6 ensayos con cada tipo de VG comparado con 6 ensayos con el vehículo son VGs).

Los datos obtenidos se obtuvieron como en el ensayo del apartado 3.1 del ordenador de a bordo y el procedimiento de ensayo, repostaje, etc. fue idéntico.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados pueden ser analizados desde dos perspectivas diferentes, el consume de combustible y el flujo de aire.

4.1. RESULTADOS EN TÉRMINOS DE CONSUME DE COMBUSTIBLE

Tras analizar los resultados recogidos en la tabla I y resumidos en la Figura 11, se pueden extraer una serie de conclusiones. Por un lado, comparando los resultados del turismo con los obtenidos previamente por Air Tab mediante el Honda Civic, se puede apreciar una reducción del coeficiente de penetración aerodinámica (Cd) de un 4,14 Si se asume que, a la velocidad del ensayo, aproximadamente el 40% del consumo de combustible se utiliza para vencer las fuerzas aerodinámicas, tal como indica Canet, Bugeda y Oñate [22], entonces se produce una reducción del consumo de combustible de aproximadamente un 1,65%. Por otro lado, los ensayos reales mediante turismo reflejan una reducción del consumo de combustible mediante el Renault Megane de un 1,76% con el uso de Air Tab y de un 3,12% con los VG co rotacionales.

En el caso de comparar los resultados obtenidos en el MIRA para vehículos articulados, donde se instalaron VGs de Air Tab únicamente en el hueco de la quinta rueda, se produjo una mejora del consumo de combustible del 1.66%, mientras que en los ensayos numéricos, con VGs instalados en el hueco de la quinta rueda y en la parte posterior, se obtuvo una mejora del 3,76%. Se puede asumir que la mejora aerodinámica se reparte de forma similar entre ambas zonas por lo que se deduce que la mejora generada en el hueco de la quinta rueda con el uso de VGs es de aproximadamente un 1,8%, similar a los resultados experimentales.

Por otro lado, los resultados obtenidos en los ensayos de carretera mediante el furgón IVECO muestran que con el uso de VGs



mejora el comportamiento aerodinámico; en concreto mediante el uso de los VG de Air Tab se reduce un 1,74% el consumo de combustible mientras que con los VG co rotacionales se reduce un 3,76%. Estos resultados experimentales son superiores a los resultados numéricos obtenidos para la zona posterior del semirremolque (2,37%), pero son asumibles ya que ni el peso ni las dimensiones del vehículo son idénticos.

Finalmente indicar que los resultados de Ken Slaughter muestran una mejora del 4% en el consumo de combustible con el uso de Air Tab en ambas zonas del semirremolque; estos resultados son similares a los numéricos que muestran una mejora del 3,78%.

4.2. ANÁLISIS DEL FLUJO DE AIRE

En la parte superior de la Figura 7 se puede observar que, en relación con el modelo sin VGs, aparece humo en la zona del hueco de la quinta rueda. Esta acumulación de humo se debe a la geometría de la zona e indica una zona donde se produce un estancamiento del aire que genera un efecto de succión. Se puede ver altas pérdidas de energía en esa zona debido a este efecto que puede reducirse mediante el uso de VGs tal como se indica en la segunda imagen (Figura 7). Además, esto indica que se produce un control de flujo en la zona exterior del hueco de la quinta rueda y una reducción de las pérdidas de energía en la zona.

Por otro lado, los resultados numéricos (ver Figura 11) indican el mismo comportamiento en la zona del hueco de la quinta rueda con un menor flujo turbulento y una menor energía turbulenta para los modelos de VG 1 a 4. El mismo fenómeno se produce en la zona posterior del vehículo. Esta reducción de la energía turbulenta indica que los VGs son capaces de controlar el flujo de aire para reducir el efecto de succión en la zona posterior (debidas a zonas con aire a velocidad nula y alta turbulencia) y en el hueco de la quinta rueda. En el caso de los modelos 2 y 3 de VG se observa que la energía turbulenta aumenta por lo que se generan mayores pérdidas aerodinámicas.

5. CONCLUSIONES

La principal conclusión que se obtiene de este artículo, como ya indicaba anteriormente el artículo "*Aerodynamic Analysis of Some Vortex Generator Improvements for Heavy Vehicles*", es el hecho de que el uso de generadores de vorticidad debidamente diseñados y colocados permite reducir el consumo de combustible en los vehículos pesados en dos zonas concretas: la zona posterior del vehículo y la zona del hueco de la quinta rueda (sólo en vehículos articulados). Por otro lado, mediante el uso de herramientas CFD se ha conseguido un alto grado de precisión comparando dichos resultados con los experimentales de diversos autores y de los ensayos descritos en el apartado 3. Por ello se puede afirmar que los VGs permiten mejorar la aerodinámica de los vehículos pesados y reducir el consumo de combustible.

Finalmente indicar que, comparando los dos tipos de generadores de vorticidad seleccionados, el que presenta un mejor comportamiento en todos los casos es el co-rotacional que ha demostrado un potencial de reducción del consumo de combustible en un vehículo articulado del 4-5%. Señalar que este tipo de elementos pueden instalarse en otros tipos de vehículos como furgones y turismos pero que es necesario realizar estudios en detalle ya que, en los vehículos de tipo turismo, la geometría de los mismos varía sustancialmente entre modelos por lo que puede no ser adecuado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Morelli, A.; "A New Aerodynamic Approach to Advanced Automobile Basic Shapes"; SAE Technical Paper n° 2000-01-0491. 2000.
- [2] Wood, R.M.; Bauer S.X.S.; "Simple and Low Cost Aerodynamic Drag Reduction Devices for Tractor-Trailer Trucks"; SAE Paper n° 2003-01-3377; 2003.
- [3] Veluri, S. P.; Roy, C. J.; Ahmed, A.; Rifki, R.; Worley, J. C.; Recktenwald, B.; "Joint Computational/Experimental Aerodynamic Study of a Simplified Tractor/Trailer Geometry"; ASME Journal of Fluids Engineering; Vol. 131, No. 8; 2009.
- [4] NOSECONE™, <http://www.nosecone.com/apvan.htm>
- [5] Visser, K.; "Drag Reduction of Tractor Trailers"; Clarkson University, Potsdam New York; 2005.
- [6] "Air tabs™ Vortex Generators Technical Trials Articulated HGV, Tractor-Trailer Gap Tests"; IRTE (Institute of Road Transport Engineers) - BTAC Brewing Transportation Advisory Committee; 2007.
- [7] Chowdhury, H.; Moria, H.; Ali, A.; et al.; "A study on aerodynamic drag of a semi-trailer truck"; 5th Bangladesh-Society-of-Mechanical-Engineers (BSME) International Conference on Thermal Engineering (ICTE). Islam Univ Technol, Dhaka, Bangladesh. 2012.
- [8] Cheli, F.; Corradi, R.; Sabbioni, E.; et al.; "Wind tunnel tests on heavy road vehicles: Cross wind induced loads-Part 1"; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics; Vol 99, Issue 10, pp 1000-1010; 2011.
- [9] Soderblom, D; Lofdahl, L.; Eloffsson, P. et al; "An Investigation of the Aerodynamic Drag Mechanisms due to Ground Simulation in Yawed Flow Conditions for Heavy Trucks"; ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vail, CO.; Vol 2, pp 313-319; 2009.
- [10] Miralbes, R.; "Aerodynamic analysis of some vortex generator improvements for heavy vehicles"; International Journal of Heavy Vehicle Systems; Vol 19, Issue 4 pp 355-370; 2012.
- [11] Zamorano-Rey, G.; Garro, B; Fernández-Gámiz, U; Zulueta, E; "A Computational Study of the Variation of the Incidence Angle in a Vortex Generator"; DYNA; Vol 13. 2015.
- [12] Aramendia-Iradi, I.; Fernandez-Gamiz, U.; Sancho-Saiz, J.; Zulueta, E; "Estado del Arte Sobre Dispositivos Activos y Pasivos de Control de Flujo para Turbinas Eólicas"; DYNA; Vol 91, pp 512-516; 2016.
- [13] Fernandez, U.; Velte, C.M.; Réthoré, P.E.; Sørensen, N.N.; Self-similarity and helical symmetry in vortex generator flow simulations", Wind Energy; Vol 19, pp 1043-1052; 2012.
- [14] Miralbes, R.; Castejon, L.; "Aerodynamic Analysis of a Vehicle Tanker"; Journal of Fluids Engineering; Vol 131; 2009.
- [15] Ambrosino F.; Funel A.; "OpenFOAM and Fluent Features in CFD Simulations on CRESCO High Power Computing System"; Final Workshop of Grid Projects, Pon Ricerca; 2006.
- [16] Lin J.C.; "Review of Research on Low-Profile Vortex Generators to Control Boundary Layer Separation"; Progress in Aerospace Science; Vol 38, Issue 4, pp 389-420; 2012.
- [17] Kuya, Y.; Takeda, K.; Zhang, X.; Beeton, S.; Pandaleon, T.; "Flow Physics of Race Car Wing in Ground Effect with Vortex Generators"; Journal of Fluids Engineering; Vol 131; 2009.
- [18] Fernandez-Gamiz, U.; Zamorano, G.; Zulueta, E.; "Computational study of the vortex path variation with the VG height". Journal of Physics Conference Series; Vol 65, pp 18-25; 2017.
- [19] Ducats, D.J.; "Lockheed Georgia Low-speed Wind Tunnel Honda Civic Hatchback Airtab(R) Modification Results"; 2009.
- [20] Slaughter, K.; "An Expediter and His AIRTABS"; www.ExpediterOnline.com
- [21] Air Tab's recommended installation procedure. <http://www.airtab.com/installation-removal.htm>
- [22] Canet, J.M., Bugeda, G. and Oñate, E. "Simulación Numérica de la Aerodinámica de Vehículos", Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería; 1991.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8321-1.pdf

