

CONTROL DEL EFECTO “BUFFETING NOISE” EN TURISMOS MEDIANTE TÉCNICAS ÓPTIMIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN.

PACS: 43.20.Ks.

Miguel Iglesias, Ismael Lengua, Larisa Dunai
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n
46022 Valencia - Spain
E-mail: miigor@upv.es, islenlen@upv.es, ladu@upv.es

ABSTRACT

En este artículo se lleva a cabo una revisión de las investigaciones en la última década sobre las diferentes técnicas para el control y visualización del efecto “Buffeting Noise” producido al circular un vehículo con una de sus ventanas abiertas. Para el estudio de este fenómeno se desarrollaron técnicas de simulación CFD, ensayos a escala real en túnel de viento, técnicas de visualización PIV, técnicas basadas en control activo de ruido, técnicas de redireccionamiento del frente de aire, etc. Tras este estudio se llegó a la conclusión de investigar en el desarrollo un sistema de control de ruido basado en las técnicas de optimización de los sistemas de ventilación del turismo.

INTRODUCCIÓN

El efecto “Buffeting Noise”, es uno de los tipos de ruidos asociados a vehículos tipo turismos, el cual ha sido catalogado desde hace años como el más molesto durante la conducción, resultando ser el que mas quejas recibe entre los compradores de vehículos nuevos.

Este fenómeno se comenzó a estudiar a mediados de los años 60 y comenzó conociéndose como “Wind Throb” [1], otros investigadores, no muy partidarios de este término, lo llamaron “Booming” por su carácter golpeante y repetitivo [2] y algunos también simplemente como “resonance” [3], este último demasiado genérico para un suceso físico tan concreto. Actualmente es conocido por la mayor parte del gremio investigador como “Buffeting Noise”.

El efecto Buffeting se caracteriza por materializarse como unas fluctuaciones variables temporales de presión sonora de baja frecuencia (inferior a 20Hz) y de un alto nivel (superiores a 100dB), imperceptibles por el oído humano debido a ser sonidos de muy baja frecuencia que se encuentran fuera del rango de audición humana, pero que por el contrario, son percibidos por el cuerpo humano como sensaciones de cambios repentinos de presión sobre el cuerpo y en especial sobre los pabellones auditivos y el tímpano, transformándose en un tipo de molestia muy intensa y puede llevar a niveles altos de fatiga incluso en periodos cortos de exposición. Existen estudios en los que se investigan los efectos de la exposición al efecto Buffeting Noise sobre las personas [4].

El efecto Buffeting Noise, se puede considerar como un ruido de cavidad, desde el punto de vista de que el habitáculo actúa como una cavidad resonante, cuando se encuentra una ventana o el techo solar abierto. Desde este punto de vista es razonable asemejarlo al conocido resonador de Helmholtz (Figura 1). Este ruido de cavidad se genera debido a los flujos de aire inestables que circulan por la parte superior de la cavidad. Estos flujos de aire generan vórtices en la parte frontal de la cavidad los cuales son transportados hacia la parte posterior, es este momento cuando los vórtices chocan con el extremo trasero de la abertura de la cavidad, generando una onda de presión que se propaga tanto hacia el interior como hacia el exterior de la cavidad. Cuando la nueva onda de presión alcanza de nuevo el borde frontal de la cavidad, de nuevo genera otro frente de vórtices. Este fenómeno sucede periódicamente a una frecuencia específica, cuando dicha frecuencia alcanza la frecuencia natural de resonancia de la cavidad, entonces se puede decir que la cavidad está actuando como un resonador de Helmholtz. La frecuencia de resonancia depende del volumen de la cavidad, de la forma de la abertura y de la velocidad del aire entre otros.

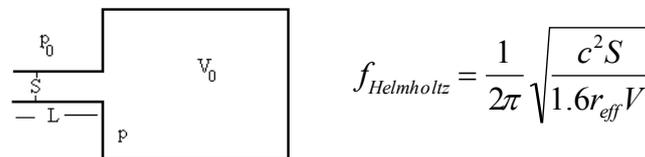


Figura 1: Modelo y formula resonador de Helmholtz

Con el objetivo de entender mejor cómo se genera este fenómeno, ya que no es tan sencillo como asemejarlo a un resonador de Helmholtz, se llevaron a cabo diferentes líneas de investigaciones. Inicialmente, partieron de tratar de determinar las condiciones en las que se generaba el ruido, el espectro sonoro de este y su nivel de presión. Posteriormente, se llevaron a cabo simulaciones mediante Software tipo CFD para tratar de ver la correlación entre los resultados en túnel de viento y la simulación, obteniendo resultados muy precisos. A su vez, para entender mejor la generación y evolución del flujo de aire y de los vórtices, se realizaron pruebas con sistemas de visualización PIV, los cuales permitieron tener una visión muy precisa de cómo se generan y desplazan los vórtices en las distintas zonas del vehículo. Y con todo ello, se llevaron a cabo múltiples técnicas para tratar de reducir o eliminar dicho ruido, consiguiendo con algunas el efecto deseado, pero sin llegar ninguna de ellas a ser implementada en la fabricación de los vehículos modernos, debido posiblemente a los cambios estéticos que conllevarían.

ESTADO DE ARTE

A mediados de los años 60, Bodger y Jones, a los cuales se les podría considerar como los descubridores de este fenómeno, comenzaron a realizar estudios para determinar las características y las situaciones que desencadenaban la generación del efecto Buffeting Noise en los vehículos tipo turismos. Pero, no fue hasta 1997, cuando Ukita, China y Kanie [5], avanzaron en el estudio de este fenómeno y decidieron llevar a cabo una investigación mediante simulación CFD (fluidodinámica computacional) y técnicas de visualización de flujo, llegando a observar las distribuciones de presión, la generación de vórtices en el caso de un techo solar y determinar los rangos de velocidad del vehículo bajo los cuales se da el efecto Buffeting Noise y su frecuencia de resonancia para el caso concreto que investigaron.

En años posteriores, se realizaron estudios desde diferentes aspectos, todos ellos aportaban nuevos conocimientos a la hora de entender la generación del efecto Buffeting Noise. En 1999, Simon Watkins y Greg Oswald [6], llevaron a cabo un estudio en el cual conseguían representar el flujo de aire que incide sobre los espejos retrovisores, con el fin de evaluar la vibración del espejo. Con ello aportaron un importante punto de vista de la evolución del flujo de aire sobre el pilar-A del vehículo.

En 2002, H. Kook y L. Mongeau [7], realizaron un estudio de las fluctuaciones periódicas de presión inducidas por el flujo de aire al sobrepasar una cavidad, mediante modelos simplificados a escala y con el cual consiguieron representar matemáticamente este suceso.

En 2003, F. Rossi y A. Nicolini [8], llevaron a cabo un experimento práctico, aplicado a dos modelos de vehículos comercializados, para representar el espectro de ruido obtenido al circular un vehículo con la ventana del conductor abierto. Durante el experimento llegaron a la conclusión de que el espectro de ruido más molesto provenía de la baja frecuencia y que si se estudiaba el vehículo como un resonador de Helmholtz, la frecuencia de resonancia coincidía con el espectro de baja frecuencia que habían obtenido en sus ensayos.

También en 2003, Dena Hendriana, Sandeep D. Sovani and Mitra K. Schiemann [9], llevaron a cabo uno de los estudios prácticos más exhaustivos realizados hasta el momento, en este, realizan una simulación mediante CFD del efecto Buffeting Noise para dos casos diferentes; el primero para un vehículo con la ventana delantera abierta y el segundo para el mismo vehículo con ventana trasera abierta. Estas dos simulaciones se realizan bajo modelos de simulación de regímenes de viento turbulentos (RNG y LES). Una vez modelados, se utilizaron para realizar estudios con el fin de cuantificar; la frecuencia de resonancia de cada caso y su nivel máximo de presión sonora, la relación del efecto Buffeting Noise con la velocidad del vehículo, con el ángulo de incidencia del flujo de aire sobre la estructura del vehículo, la intensidad del flujo de aire que consigue acceder al interior del vehículo y la mejora que se aprecia al insertar en el vehículo escapes de aire o modificaciones en los espejos retrovisores.

RNG vs LES: Frecuencia y amplitud se simulan bien, con 1,5 Hz de diferencia respecto a los ensayos en túnel de viento.

Los sistemas no funcionan bien para ángulos de incidencia del aire de 0º, el resto de casos generan errores de amplitud de 4 dB.

Intensidad Flujo: Las diferencias son inapreciables por lo que no afecta a los resultados.

Ángulo Incidencia: No afecta a la frecuencia de resonancia, pero si al nivel de presión sonora en el caso de la ventana delantera abierta, en el caso de ventana trasera no afecta.

Para este caso la simulación RNG no calcula bien los cambios de nivel de presión sonora.

Velocidad: Se realizan ensayos con dos velocidades, 50 y 60 mph (80,5 y 96,6 km/h) y se llega a la conclusión de que es más perceptible el cambio de velocidad con ventana trasera abierta que con ventana delantera.

Posición Ocupantes: La posición de los ocupantes del vehículo no afecta ni a la frecuencia de resonancia ni al nivel de presión sonora percibidos.

Escape de Aire: Realizan una serie de aireadores que simulan una falta de hermeticidad en el vehículo, los resultados desprenden que no hay cambios ni en la frecuencia de resonancia ni en el nivel de presión sonora.

Abrir otra ventana: Realizan la prueba teniendo la ventana delantera izquierda y la ventana trasera derecha bajadas y con ello consiguen una reducción del nivel de presión sonora de 17 dB.

Diseño Retrovisores: La eliminación del espejo retrovisor es perjudicial para la generación del efecto Buffeting Noise.

Diseñaron un espejo con el brazo igual de ancho que el espejo y consiguieron una reducción del nivel de presión sonora de 14 dB para el caso de ventana delantera abierta y de 5 dB para el caso de ventana trasera abierta.

En 2005 se desarrolló uno de los estudios más importantes en cuanto a caracterización del efecto Buffeting Noise y de su reducción mediante técnicas de ventilación del vehículo. Lo llevaron a cabo, Chang Fa, de la corporación Exa junto con Mitzchell Puzkarz, Kanwerdip Singh y Mark G. Gleason, de la corporación de DaimlerChrysler [10]. Realizan un estudio mediante simulación CFD de tres modelos diferentes de vehículos, dos tipos turismo y uno tipo minivan. Determinaron que la frecuencia de resonancia se centra entre 15 y 20 Hz dependiendo de la forma y volumen interior del vehículo y que el nivel de presión sonora se sitúa por encima de los 125 dB para todos los modelos estudiados, incluso llegando a los 135 dB en el peor de los

casos. A su vez, efectuaron una comparativa entre experimentos realizados en túnel de viento y mediante simulación CFD, obteniendo resultados muy próximos, del orden de diferencias de 2 Hz y 2dB. Las técnicas de reducción estudiadas son las siguientes:

Ventanilla trasera abatible: Mediante la apertura de la ventanilla trasera abatible 5°, se consigue desplazar la frecuencia de, 15 Hz a 24 Hz y atenuar de 127 dB a 111 dB.

Barra divisoria: La frecuencia de resonancia sigue siendo la misma y la atenuación va de 127 dB a 107 dB.

Extractor en Pilar-C: La frecuencia de resonancia sigue siendo la misma y la atenuación va de 127 dB a 105 dB.

Inyector aire en Pilar-B: Sistema de control activo que genera una corriente de aire paralela a la ventana. La frecuencia de resonancia sigue siendo la misma y la atenuación va de 127 dB a 121 dB.

Cavidad en Pilar-B: Consiguiendo atenuaciones entorno a 7 dB.

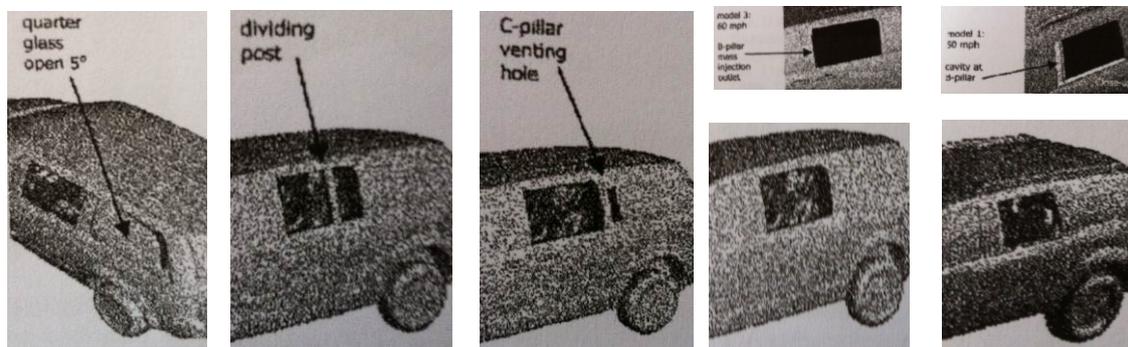


Figura 2: Sistemas ensayados para la reducción del efecto buffeting noise. [10]

En 2007, Carry Deaton, Mohan Rao y Wei-Zen Shih [11], realizaron una investigación bajo la cual determinaron la existencia de tres regiones diferenciadas de desplazamiento del flujo de aire que recorre el lateral del vehículo y estudiaron como intervienen cada una de estas regiones en la generación del efecto Buffeting Noise.

La primera región o región superior; es aquella que se desplaza por la parte superior de las ventanas laterales, comenzando en el pilar-A se va desplazando generando vórtices por la parte superior del vehículo hasta sobrepasar la totalidad del mismo. Dichos vórtices van creciendo en tamaño conforme recorren mayor distancia. Este hecho corrobora la mayor facilidad de generación del efecto Buffeting Noise por las ventanas traseras frente a las delanteras.

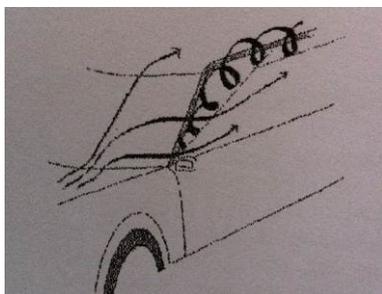


Figura 3: Formación de Vórtices en el Pilar-A. [11]

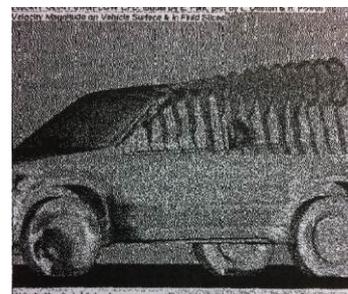


Figura 4: Visualización del frente de aire en espiral modelado bajo simulación CFD [11]

La segunda región o región inferior (Von Karman Vortex Flow), estos vórtices son el resultado de interponer un objeto en la trayectoria de un flujo de aire. En el caso de un vehículo, este efecto lo genera la presencia del espejo retrovisor, el cual genera una zona tras él que se comporta bajo este patrón. Al igual que anteriormente, los vórtices se van haciendo mayores cuanto más se alejan del objeto que los generó, llegando a tener un tamaño considerable a su

paso por la ventana trasera del vehículo y contribuyendo a la generación del efecto Buffeting Noise cuando la ventana tiene una abertura superior a $\frac{1}{2}$.

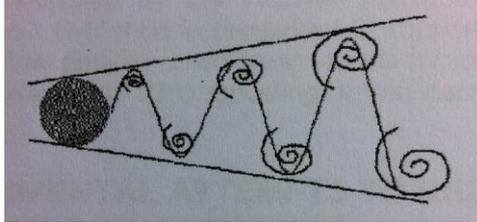


Figura 6: Calle de vórtices de Von Karman. [11]

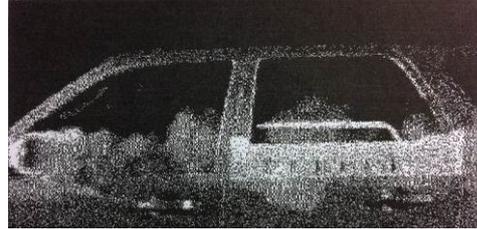


Figura 7: Calle de vórtices de Von Karman en ventanilla trasera [11]

La tercera y última región es la denominada media o región de flujo reacomodado, en esta región los vórtices generados por el flujo de aire son de forma cilíndrica y se deben a la aparición de un borde en la trayectoria del flujo de aire, a partir del cual el flujo toma forma cilíndrica al igual que sucede con la generación de vórtices debido a techos solares.

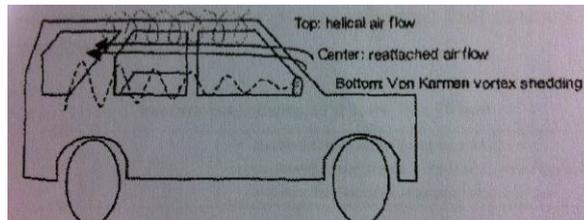


Figura 8: Resumen de las tres regiones de flujos de aire. [11]

En esta misma investigación llevaron a cabo pruebas implementando varias modificaciones en vehículos reales para calcular la atenuación conseguida:

Modificación Espejos Retrovisores: Realizaron pruebas con dos modelos, el primero, al cual realizan cortes horizontales en su cara posterior y el segundo, al cual le realizan inserciones mediante patrones tipo colmenas en su cara inferior. No dieron resultados positivos.

Eliminación de los Espejos: El efecto Buffeting Noise aumenta en 2 dB su nivel de presión sonora.

Deflectores en Techo: Consigue una reducción de 5-6 dB un ligero desplazamiento de la frecuencia de resonancia hacia mas baja frecuencia. Estos deflectores generan el efecto de que las espirales de los vórtices sean de mayor tamaño, con lo cual la superficie útil del resonador de Helmholtz disminuye y por lo tanto se consigue una atenuación del nivel de presión máximo. Este hecho fortalece la importancia de las diferentes regiones de flujo de aire en la generación del efecto Buffeting Noise.



Figura 9: Inserciones en techo [11]

Deflector en Pilar-B: Para poder comprobar si la región media contribuye en la generación del Buffeting Noise, realizaron un ensayo mediante la colocación de un deflector

vertical en el pilar B. Y se llegó a la conclusión de que el deflector llega a su máximo de atenuación con una longitud de 12 cm medidos desde el borde superior de la ventana y durante los 2 cm primeros el deflector no actúa.

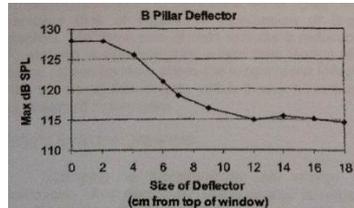


Figura 10: Resultados de la variación de longitud del deflector de Pilar-B [11]

Tamaño del hueco de ventana abierta: El hecho de abrir la ventana afecta a la generación del efecto Buffeting Noise. Se comprobó que durante los primeros 7 cm de abertura no se genera el efecto, esto es debido a que los vórtices (debido a su tamaño) no llegan a golpear el aire de la abertura hasta que la misma no tiene un tamaño superior.

Sellado del vehículo: Se procedió a realizar pruebas creando un habitáculo más hermético, sin pérdidas de aire, y los resultados desprendieron un aumento de 2 dB en el nivel de presión sonora del Buffeting Noise.

En 2008, se llevaron a cabo varias investigaciones en diferentes aspectos. Una de las más interesantes fue la realizada en colaboración la Universidad de Notre Dame y la corporación Chrysler [12], en la cual se efectuó una comparativa en la precisión obtenida con modelos simplificados a pequeña escala y modelos a escala real de vehículos. Al mismo tiempo, se profundizó en la visualización de los flujos de aire en la posición de la ventana abierta mediante técnicas PIV (Particle Image Velocimetry).

Otro artículo de interés, fue el elaborado por F. Chen y P. Qian [13], mediante el cual efectuaron un estudio de la reducción del Buffeting Noise mediante la apertura de una segunda ventana. Llegando a la conclusión de que se consigue la máxima atenuación abriendo las dos ventanas del mismo lado, debido a que se genera un flujo de aire inverso dentro del habitáculo, el aire entra por la ventana trasera y realiza un movimiento circular por la parte más externa del habitáculo interior hasta abandonar el habitáculo por la ventana delantera del mismo lado por el que entró, este proceso contribuye a una recirculación óptima del aire interior del vehículo.

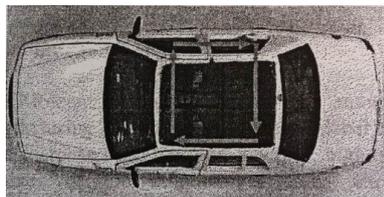
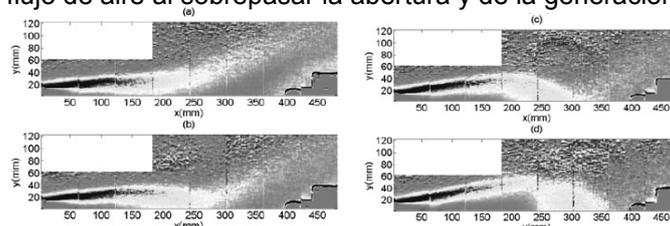


Figura 11: Esquema del movimiento del frente de aire desde el exterior al interior del vehículo con las ventanas del mismo lado abiertas. [13]

También en 2008 H. S. Kook [14], realizó una investigación práctica para visualizar los flujos de aire periódicos sobre un techo solar usando técnicas PIV (Particle Image Velocimetry), la cual continuaría en 2010, obteniendo como resultado una visualización temporal del comportamiento del flujo de aire al sobrepasar la abertura y de la generación de vórtices.



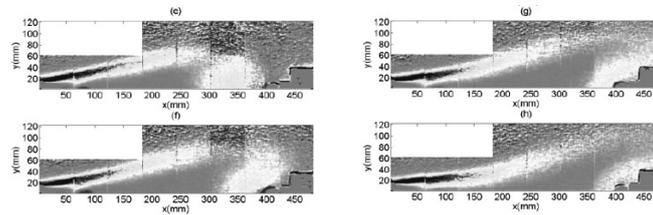


Figura 12: Visualización temporal del comportamiento del flujo de aire al sobrepasar la abertura. [14]

Y por último en este año, se realizaron los primeros estudios sobre evaluación de la calidad acústica del efecto Buffeting Noise [15] y los trastornos respiratorios en el ser humano debidos al efecto Buffeting Noise [16].

En 2009, Bernd Crouse, Ganapathi Balasubramanian, Sivapalan Senthoran, David Freedm Kang-Duck ih y Seong Ryong Shin [17], llevaron a cabo una investigación de la eficiencia de la colocación de deflectores en la reducción del efecto Buffeting Noise generado por los techos solares. Para ello llevaron a cabo una campaña de simulaciones mediante técnicas CFD de diferentes modelos de deflectores. Tras ello implementaron uno de los modelos de deflector en dos vehículos, uno tipo SUV (Sport Utility Vehicle) y otro tipo Sedan, obteniendo como resultados que en el SUV el deflector funcionó reduciendo el efecto Buffeting Noise y en el Sedán no.

En 2010, H. S. Kook, junto con S. R. Shin y G. D. Ih [18], continuaron la investigación comenzada por este en 2008, para la medición del efecto Buffeting Noise de los techos solares con sistemas de deflectores automáticos. Tratando con ello de llegar a determinar la posición, forma y ángulo óptimo que debía tener el deflector para conseguir una óptima reducción del efecto buffeting en función de la velocidad del vehículo.

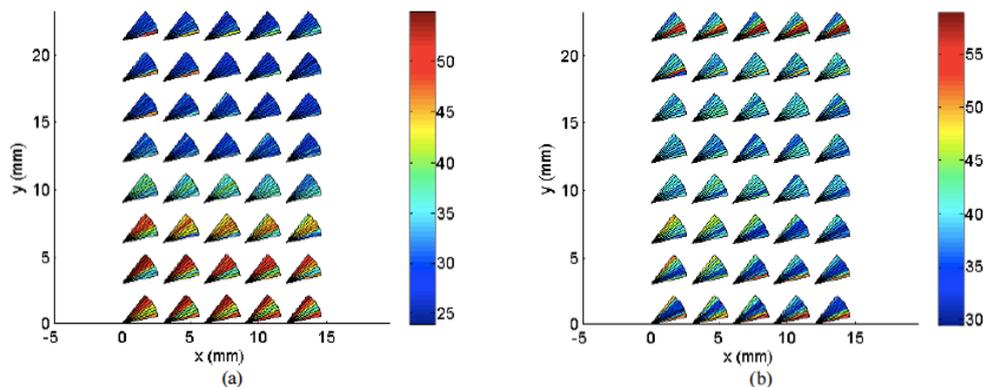
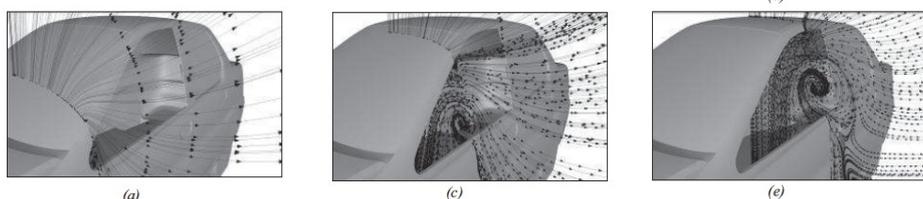


Figura 13: Graficas del nivel de presión sonora de un techo solar a velocidad de 40 km/h ^(a) y 50 km/h ^(b) [18]

A su vez en 2010, Ashish Singh, Deepanshu Rajvanshi y Kishor Nikam [19], llevaron a cabo un estudio mediante simulación CFD de un vehículo Sedan, consiguiendo representar la evolución temporal de los vórtices generados con ventana delantera abierta.



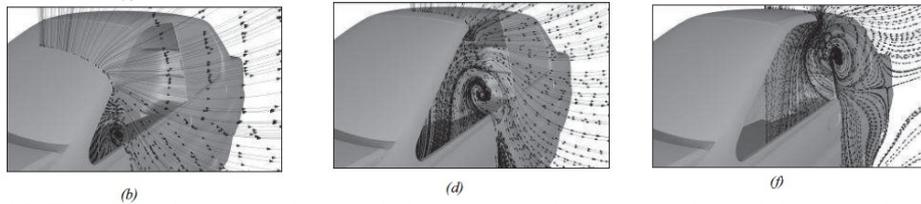


Figura 14: Evolución temporal de los vórtices generados con ventana delantera abierta. [19]

En 2011, Keichiro Lida, Yoshimitsu Hashizume, Hiroshi Narita, Long Wu, Ganapathi Balasubramanian y Brend Crouse [20], efectuaron un experimento de simulación CFD con modelos a escala real de tres tipos diferentes de deflectores para techos solares.

Y ya por último en 2012, Ying-Chao Zhang, Jing Zhao, Ji li y Zhe Zhang [21], realizaron y publicaron la última investigación conocida al respecto, en la cual efectuaron una comparativa entre simulación numérica y ensayos en túnel de viento de un vehículo con diferentes configuraciones de ventanas abiertas y de diversos grados de apertura de las mismas. Permitiendo visualizar y entender el comportamiento del flujo del aire en el interior y exterior del vehículo.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de la efectividad, a la hora de eliminar la aparición del efecto Buffeting Noise en vehículos tipo turismo cuando circulan con las ventanas traseras abiertas, se llega a la conclusión de que las técnicas de optimización de los sistemas de ventilación y recirculación del flujo de aire interior del vehículo, son las más adaptables a los diferentes modelos de vehículos del sector, garantizando un óptimo comportamiento en la eliminación del efecto en su totalidad.

REFERENCIAS

- [1].- Bodger, W.K. and Jones, C.M., Aerodynamic Wind Throb in passenger car, SAE Transactions, Vol. 73, pp. 195-206 (1965)
- [2].- Sung-Hwan Shin, Jeong-Guon Ih, Takeo Hashimoto and Shigeko Hatano. Sound quality evaluation of the booming sensation for passenger cars. Applied Acoustics 70 pp. 309–320 (2009)
- [3].- Ota, D.K., Chakravarthy, S.R., Becker, T. and Sturzenegger, T., Computational study of resonante supresión of open sunroofs, Journal of Fluids Engineering, Vol. 116, pp. 877-882 (1994)
- [4].- Wei Lin Sung, Neeraj Kohli, Shamim Qu'adir, John F. Golding, Adolfo M. Bronstein and Michael A. Gresty (2011) Respiratory vulnerability to Vehicle buffeting. Clin Auton Res. 2011 Dec 21(6):365-71. Doi: 10.1007/s10286-011-0124-8. Epub 2011 May 6.
- [5].- Ukita T., China H. And Kanie K. Analysis of Vehicle wind throb using CFD and flow visualization. SAE Paper 970407.
- [6].- Simon Watkins and Greg Oswald. The flow field of automotive add-ons with particular referente to the vibration of external mirrors. Vol. 83, Issues 1-3-Nov-1999, Page: 541-554.
- [7].- H. Kook and L. Mongeau. Analysis of the periodic pressure fluctuations induced by flow over a cavity. Journal of sound and vibration. DOI: 10.1006, Page: 823-846.
- [8].- F. Rossi y A. Nicolini, Theoretical and experimental investigation of the aerodynamic noise generated by air flows through car windows. Euronise Naples 2003. Paper ID: 128/p.1.
- [9].- Dena Hendriana, Sandeep D. Sovani and Mitra K. Schiemann. On Simulating Passenger Car Side Window Buffeting. SAE International. 2003-01-1316.

- [10].- Chang Fa, Mitzchell Puzkarz, Kanwerdip Singh and Mark G. Gleason. Attempts for Reduction of Rear Window Buffeting Using CFD. SAE International, 2005-01-0603, Pages: 97-104
- [11].- Carry Deaton, Mohan Rao and Wei-Zen Shih. Root Cause Identification and Methods of Reducing Rear Window Buffeting Noise. SAE International. 2007-01-2402. Pages: 01-09.
- [12].- Paul E. Slaboch, Scott C. Morris, Roulong Ma, Daniel Shannon, Mark Gleason and Mitchell Puskarz. Window Buffeting Measurements of a Full Scale Vehicle and Simplified Small Scale Models. Sae International. 09B-0412.
- [13].- F. Chen and P.Qian. Vehicle Wind Buffeting Noise Reduction via Window Openings Optimization. SAE International. 2008-01-0678. Pages: 25-27.
- [14].- H. S. Kook. Visualization of periodic flows over a sunroof opening by using a phase-marked piv measurement. International Journal of Automotive Technology, Vol. 9, No. 4, pp. 493–500 (2008) DOI 10.1007.
- [15].- Sung-Hwan Shin, Jeong-Guon Ih, Takeo Hashimoto and Shigeko Hatano. Sound Quality Evaluation of the Booming Sensation for Passenger Cars. ELSEVIER. Applied Acoustics 70 (2009). Pages: 309–320.
- [16].- David Andrew Green, John Foster Golding, Aulukh Mandip, Mary Catherine Faldon, Kevin Graeme Murphy, Adolfo Miguel Bronstein, PMriocfh.ael Andrew Gresty. Adaptation of ventilation to 'buffeting' in vehicles. Clin Auton Res (2008) DOI 10.1007/s10286-008-0491-y. Pages: 346–351.
- [17].- Bernd Crouse, Ganapathi Balasubramanian, Sivapalan Senthoooran, David Freedm Kang-Duck ih and Seong Ryong Shin. Investigation of gap Deflector Efficiency for Reduction of Sunroof Buffeting. SAE International. 2009-01-2233.
- [18].- Hyung-Seok Kook, Seong-Ryong Shin and Gang-Duck Ih. Measurement of the Sunroof Buffeting Noise with an Automatic Deflector-Traversing Device. International journal of precision engineering and manufacturing Vol. 11, No. 1, DOI: 10.1007/s12541-010-0001-8. Pages: 5-11.
- [19].- Ashish Singh, Deepanshu Rajvanshi and Kishor Nikam. Buffeting Noise Computations for an Open Side Window. Proceedings of the 37th National & 4th International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power. December 16-18, 2010, IIT Madras, Chennai, India. FMFP10 - AM - 13
- [20].- Keichiro Lida, Yoshimitsu Hashizume, Hiroshi Narita, Long Wu, Ganapathi Balasubramanian and Brend Crouse. Experimental And Numerical Investigation of Automotive Wind Throb Phenomenon. ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference. AJK-Fluids 2011 Japan. AJK2011-23004. Pages: 853-858.
- [21].- Ying-Chao Zhang, Jing Zhao, Ji li and Zhe Zhang. Wind tunnel tests and aerodynamic numerical simulations of car opening Windows. Int. J. Vehicle Design, Vol. 58, No. 1, 2012. Pages: 62-78.
- [22].- Kenneth J. Karbon and Rajneesh Singh. Simulation and Design of Automobile Sunroof Buffeting Noise Control. AIAA 2002-2550. Pages: 1515-1520.
- [23].- Xijia Zhu and Mark Gleason. A Process of Side Windows Buffeting Prediction. SAE International. 2006-01-1573. Pages: 461-464.
- [24].- Richard Walker and Wei Wei. Optimization of Mirror Angle for Front Window Buffeting and Wind Noise Using Experimental Methods. SAE International. 2007-01-2401.
- [25].- L. Mongeau, M. A. Franchek and H. Kook. Control of Interior Pressure Fluctuations Due to Flow Over Vehicle Openings. Society of Automotive Engineers, Inc. 1999-01-1813. Pages: 1257-1265.
- [26].- Chang-Fa An, Seyed Mehdi Alaie and Michael S. Scislowicz. Impacto f Cavity on Sunroof Buffeting – A Two Dimensional CFD Study. ASME, July 25-29, 2004, San Diego, California USA, PVP2004-3099. Pages: 133-144.
- [27].- M. Maffei, A. Bianco and G. Carlino. Side Window Buffeting Investigation by Stereoscopic Particle Image Velocimetry in Low and High Turbulent Regime. SAE International. 2009-01-0182. Pages: 131-142.