

SIMULACIÓN NUMÉRICA Y PROTOTIPADO DE GENERADORES DE VÓRTICE PARA MEJORAMIENTO AERODINÁMICO EN VEHÍCULOS SEDÁN

NUMERICAL SIMULATION AND PROTOTYPING OF VORTEX GENERATORS FOR AERODYNAMIC IMPROVEMENT IN SEDAN VEHICLES

Franklin Fonseca Paredes ^{1*}

¹ Carrera de Mecánica Automotriz, Instituto Superior Tecnológico Tungurahua. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4493-8450>. Correo: ffonseca@institutos.gob.ec

Juan Villacís López ²

² Carrera de Mecánica Automotriz, Instituto Superior Tecnológico Tungurahua. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1284-4994>. Correo: jvillacis@institutos.gob.ec

César Pazmiño Carrera ³

³ Carrera de Mecánica Automotriz, Instituto Superior Tecnológico Tungurahua. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8776-5231>. Correo: cpazmino@institutos.gob.ec

*** Autor para correspondencia: ffonseca@institutos.gob.ec**

Resumen

El objetivo de la investigación se enfocó en estudiar la influencia que tienen los generadores de vórtices en las características aerodinámicas de vehículos tipo sedán. Para conseguir este estudio se diseñó un modelo dinámico que permita determinar las fuerzas que actúan sobre el vehículo y sobre los generadores de vórtices, realizando simulaciones en software especializado. Se realizó el análisis con el programa de elementos finitos disponible. En este programa se sometió la geometría a distintas condiciones. La primera operación fue crear un volumen de control. Una vez obtenido el volumen se determinó las características correctas de mallado, para proceder a simularlo y posteriormente a obtener los datos de fuerzas que el programa refleja. Los resultados revelaron que la altura de los generadores de vórtices y su orientación respecto al flujo no son valores arbitrarios, sino que de ellos depende la fuerza resultante que el fluido provoca sobre el vehículo, por lo que el diseño de los generadores de vórtices no será aleatorio y existirán dimensiones adecuadas en lugares específicos de ubicación. Finalmente, con las dimensiones correctas del generador de vórtice se utilizó

impresión 3D para prototiparlo utilizando filamento de PLA con propiedades mecánicas y nivel de rugosidad acordes a los requerimientos.

Palabras clave: aerodinámica; generador de vórtice; automóvil; capa límite.

Abstract

The objective is focused on studying the influence that vortex generators have on aerodynamic characteristics of sedan vehicles. To achieve this study, a dynamic model has been designed to determine the forces acting on the vehicle and on vortex generators, performing simulations in specialized software. Subsequently, the analysis was carried out with the available finite element program. In this program, the geometry was subjected to different conditions. The first operation was to create a control volume. Once the volume is obtained, the correct meshing characteristics are extended, to simulate it and later obtaining the force data that the program reflects. The results revealed that the height of vortex generators and their orientation with respect to flow are not arbitrary values, but the resultant force that fluid causes on vehicle depends on them, so the design of vortex generators will not be randomly and there will be suitable dimensions in specific places of location. Finally, with the correct dimensions of vortex generator, 3D printing was shown to prototype it using PLA filament with mechanical properties and level of roughness according to the requirements.

Keywords: aerodynamics; vortex generator; car; layer boundary

Fecha de recibido: 05/02/2023

Fecha de aceptado: 27/05/2023

Fecha de publicado: 08/06/2023

Introducción

Un automóvil tiene excelentes condiciones aerodinámicas cuando ofrece menor resistencia al choque directo del aire estando éste en movimiento; esta resistencia aumenta debido a los pequeños apéndices del vehículo como son los retrovisores, manillas, molduras y antena, pues provocan la necesidad de mayor potencia del motor y por consiguiente elevado consumo de combustible.

La carga de arrastre en los automóviles debido a la carga del viento es extremadamente importante para lograr la eficiencia del combustible. Los generadores de vórtices (GV) se han utilizado en las alas de los aviones para reducir dicha carga. En un concepto similar, se considera factible que la carga de arrastre en el automóvil también pueda reducirse mediante la provisión de GV (Selvi Rajan, Harikrishna, Senthilkumar, & Parammasivam, 2013).

Para Baldacchino, Ferreira, & De Tavernier (2018), en el diseño y desarrollo de GV se tienen que considerar las condiciones ambientales del sitio de prueba para optimizar el control de flujo, es decir, las dimensiones y forma del elemento de prueba depende del lugar geográfico.

Con la utilización de software de dinámica de fluido computacional (CFD) se logró determinar la trayectoria de las líneas de flujo de aire que inciden sobre la carrocería tipo sedán, logrando de esta manera establecer criterios validados para su fabricación mediante impresión 3D. Por lo tanto, los GV son dispositivos económicos y de fácil manufactura que permiten el mejoramiento aerodinámico en gran medida sin tener que modificar la estructura original del automóvil.

Según, (Queralt, 2017) son varias las formas y diseños que se pueden usar a fin de generar vórtices para mejorar las condiciones de la capa límite. No existe un único diseño, en cada caso particular se pueden implementar diferentes geometrías del VG, no obstante no sirve cualquier geometría, ni cualquier disposición de los mismos encima del turismo.

El tipo de GV seleccionado es el Airtab (Queralt, 2017) que es un generador de vórtices de tipo espoleta, se diseña especialmente para disminuir el arrastre aerodinámico de los remolques del tractor. Los Airtabs se fabrican de modo que el dispositivo se extiende fuera de la capa límite sin ningún borde puntiagudo. Son aproximadamente unos 25mm de alto, 100mm de largo, y 125mm de ancho.

Para la simulación numérica del GV, se utilizó inicialmente software CAD (Diseño Asistido por Computador) para el trazo de la geometría, como se indica en la *Figura 1*, considerando el modelo airtab (Airtab, 2023) que se comercializa principalmente para mejorar el rendimiento aerodinámico en camiones.



Figura 1. Geometría CAD de generador de vórtice.

La geometría para la superficie base de los airtab fue considerada sobre el vehículo modelo Targa (Autocasión, 2013), cuya forma se asemeja a un coupé. Para obtener su forma tridimensional numérica, también se utilizó un software CAD donde se representó las formas más representativas de la carrocería y disminuyendo los detalles no incidentes para el análisis aerodinámico.

En cuanto a la ubicación de los GV, como se muestra en la Figura 2, van colocados en el extremo delantero del techo del automóvil, para que el viento actúe paralelo a la longitud del coche y se produzca una reducción significativa del coeficiente de arrastre. (Selvi Rajan, Harikrishna, Senthilkumar, & Parammasivam, 2013).

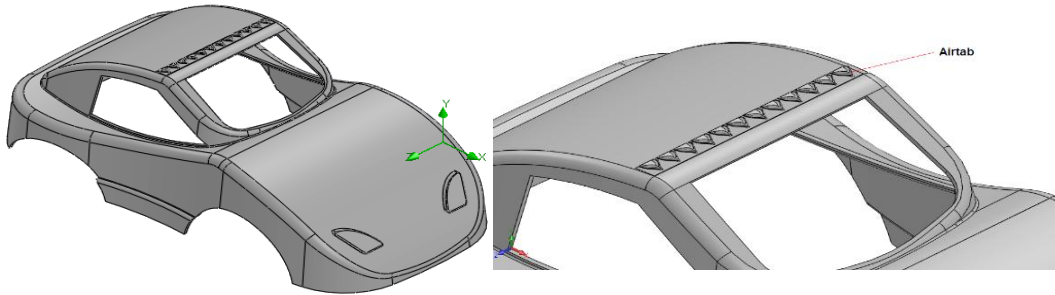


Figura 2. Ubicación de generadores de vórtice.

Para el estudio CFD (Computational Fluid Dynamics) se consideró el método de mallas cartesianas (Sobachkin & Dumnov, 2014) que permiten realizar cálculos multifísicos combinados, en una mallas computacional con celdas de fluidos, celdas de sólidos y celdas parciales.

Además, en el análisis computacional se utilizan las ecuaciones de de Navier-Stokes, que son formulaciones de las leyes de conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía, las mismas que permiten la predicción de flujos turbulentos.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mu_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \mu_i \mu_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho \mu_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_1) + \frac{\partial \rho}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad (3)$$

$$H = h + \frac{u^2}{2}$$

Para el cálculo de flujos compresibles a alta velocidad y flujos con ondas de choque, se utiliza la ecuación de energía (Sobachkin & Dumnov, 2014).

$$\frac{\partial p E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i (E + \frac{p}{\rho})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + p \varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad (4)$$

$$E = e + \frac{u^2}{2}$$

Para complementar este grupo de ecuaciones, se emplea el modelo matemático de transporte para la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación, con el modelo modificado de turbulencia k-ε (Iyer & Yavuzkurt, 1999) que describen los flujos laminares, turbulentos y de transición de fluidos homogéneos, basados en funciones de amortiguación (Lam & Bremhorst, 1981)

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) + \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_B \mu_t P_B \right) - f_2 C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\tau_{ij} = \mu s_{ij}, \tau_{ij}^R = \mu_t s_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, s_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (7)$$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (8)$$

Donde: $c_u = 0,09$; $c_{\varepsilon 1} = 1,44$; $c_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $\sigma_B = 0,9$; $c_B = 1$ si $P_B > 0$; $c_B = 1$ si $P_B < 0$; la viscosidad turbulenta se determina a partir de:

$$\mu_t = f_u \frac{c_u \rho k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

La función de amortiguamiento de Lam y Bremhorst f_u se determina a partir de:

$$f_u = (1 - e^{-0.025 R_y})^2 \cdot \left(1 + \frac{20.5}{R_t} \right) \quad (10)$$

Donde:

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu} \quad (11)$$

$$R_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \quad (12)$$

y es la distancia desde el punto a la pared y las funciones de amortiguamiento de Lam y Bremhorst f_1 y f_2 se determina a partir de:

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_u} \right)^3, f_2 = 1 - e^{R_t^2} \quad (13)$$

Las funciones de amortiguamiento de Lam y Bremhorst f_u, f_1, f_2 reducen la viscosidad turbulenta y la energía de turbulencia y aumentan la capacidad de disipación de la turbulencia cuando el número de Reynolds R_y basado en la velocidad media de las fluctuaciones y la distancia desde la pared es demasiado pequeño. Cuando $f_u = 1, f_1 = 1, f_2 = 1$ el enfoque vuelve al modelo $k - \varepsilon$ original.

Para la simulación aerodinámica, se establece un dominio computacional de 1500mm en el eje x(+), 250mm en el eje y(+), 250mm en el eje z(+). El modelo de prueba tiene una escala de 1:23.3, siendo sus dimensiones reales. (km77,2023): longitud 4519mm, anchura 1852mm, altura 1299mm y batalla 2450mm.

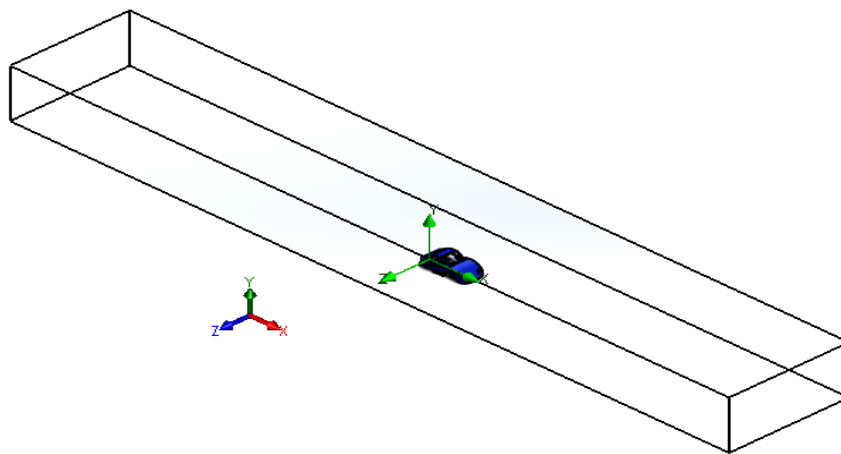


Figura 3. Dimensiones dominio computacional.

El dominio computacional establecido simula la utilización de un túnel de viento real (Akshoy, Anuj, & Firoz, 2019), con dirección de viento frontal en x(-), de acuerdo al sistema de referencia global del programa, y que abarca todo el volumen formado alrededor del vehículo aparentemente en movimiento.

En la Tabla 1 se muestran las condiciones de frontera aplicadas para la simulación computacional, considerando una velocidad de entrada de 100km/h (Harun, y otros, 2013), y a la salida la presión atmosférica local de 0,8 bar y una temperatura ambiental de 18°C.

Tabla 1. Condiciones de frontera para simulación.

Parámetros termodinámicos	Presión ambiental: 0.80 atm Temperatura ambiental: 18 °C
Parámetros de velocidad	Vector velocidad Velocidad in X: -100.000 km/h Velocidad in Y: 0 km/h Velocidad en Z: 0 km/h

Celdas del fluido	18363
Celdas del sólido	3510

Materiales y métodos

El método utilizado es la simulación numérica computacional, que permite encontrar soluciones rápidas a problemas tecnológicos complejos, basados en métodos matemáticos de aproximación, entre otros el FEM (Finite Element Method) (Bahte, 2007) que se fundamenta en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos (Frías Valero, 2004).

En la Figura 4 se presenta el proceso (Chen & Liu, 2015) utilizado para la realización de la investigación, el mismo que comprende el CAD (Computer Aided Desing), CAE (Computer Aided Engineering) y el CAM (Computer Aided Manufacturing), este último sustituido por el prototipado rápido, es decir la impresión 3D.

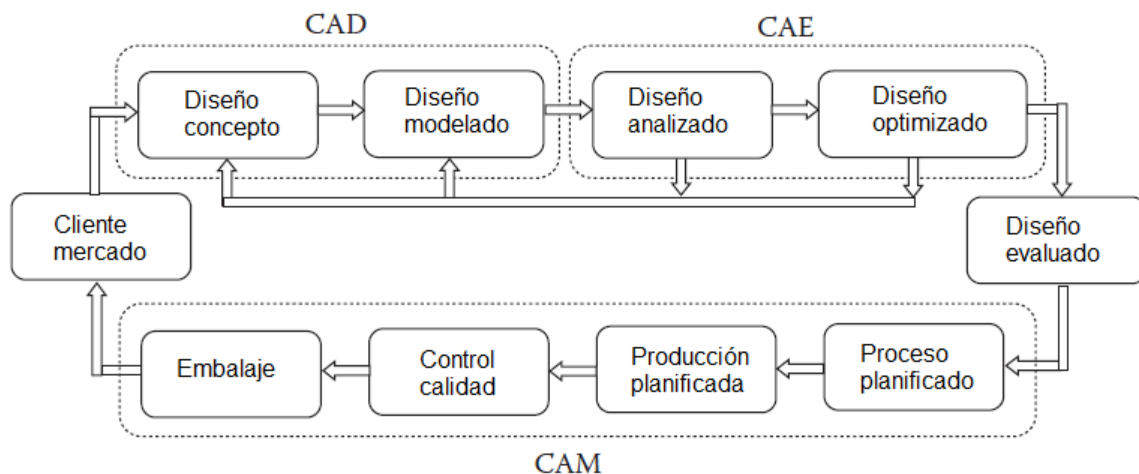


Figura 4. Proceso de desarrollo de productos asistido por computadora.

Fuente: (Chen & Liu, 2015)

Para el prototipado del generador de vórtice, se utilizó una impresora 3d Da-Vinci 1.0 Pro (XYZ PRINTING, 2023), cuyas características se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones impresora 3d Da-Vinci 1.0 Pro

Dimensiones del producto		
Ancho	18,4in (46,8 cm)	
Alto	22in (55,8 cm)	
Profundidad	20in (51 cm)	

Fuente: (XYZ PRINTING, 2023)

El material utilizado para la impresión del GV es PLA (Ácido Poliláctico), que es uno de los bioplásticos de mayor consumo en el mundo. Es un poliéster alifático obtenido de fuentes renovables como el azúcar de maíz, el almidón, la papa y la caña de azúcar. El PLA tiene un 37% de cristalinidad, un alargamiento a la rotura del 30,7%, una temperatura de transición vítrea de 53°C y una temperatura de fusión que oscila entre 170 y 180°C. (Vroman & Tighzert, 2009).

La elección de este polímero se debe a la baja rugosidad y excelente acabado que se obtienen como producto final de la impresión 3d, además de las aceptables propiedades mecánicas (Ultimaker, 2017) descritas en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades mecánicas del PLA.

Propiedades Mecánicas	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad a la tracción	2346,5	MPa
Esfuerzo de tracción a la deformación	49,5	MPa
Esfuerzo de tracción a la rotura	45,6	MPa
Alargamiento a la deformación	3,3	%
Alargamiento a la rotura	5,2	%
Resistencia a la flexión	103	MPa
Módulo de flexión	3150	MPa
Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella (a 23 °C)	5,1	KJ/m2
Dureza	83	Shore D
Índice de fluidez (MFR)	6,09/10	gr/min
Transición vítrea	~60	°C
Temperatura de fusión	145-160	°C
Gravedad específica	1,24	

Fuente: (Ultimaker, 2017).

Resultados y discusión

Se hace la comparación de los parámetros termodinámicos obtenidos en la carrocería Targa con GV y sin GV, en los cuales la presión del fluido alrededor del modelo se mantiene constante con 0,80 atm que es el valor utilizado inicialmente en la simulación, la velocidad disminuye con GV en 3,5% debido a la obstrucción que presentan los airtab al movimiento libre del aire, la temperatura se incrementa 0,30°C con respecto a la temperatura ambiental, esto debido a la fricción con la carrocería pero permanece constante en ambos casos, y finalmente la fuerza neta de resistencia del aire se decrementa en 7,47%. Los resultados obtenidos del análisis CFD se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros obtenidos por análisis computacional

Parámetro	Unidad	Valor	
		Con GV	Sin GV
Presión	atm	0,80	0,80
Velocidad	km/h	87,93	91,13
Temperatura fluido	°C	18,08	18,06
Temperatura carrocería	°C	18,39	18,39
Fuerza neta	N	2,91	3,145

En la Figura 5 se observan las líneas de flujo turbulento distribuidas sobre el vehículo en ambos casos de la comparación.

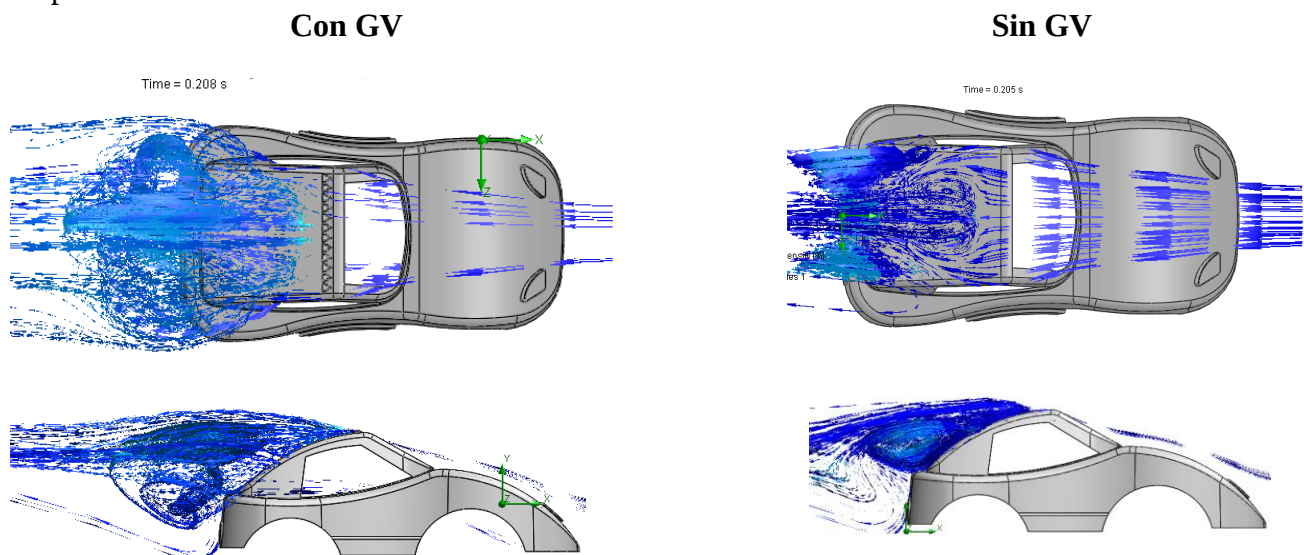


Figura 5. Líneas de flujo de aire.

De acuerdo a datos obtenidos en la simulación CFD, los GV hacen que la intensidad de turbulencia en la parte superior del vehículo llegue a 334,76%, logrando de esta manera mantener durante mayor tiempo la capa límite creada por el fluido y extender su longitud de cubrimiento.

Para la verificación del rendimiento aerodinámico, se calcula el coeficiente C , mostrado en la *Tabla 5*, aplicando la ecuación experimental (15) (Harun , y otros, 2013):

$$Ra = \frac{1}{2} * \rho * C * S * v^2 \quad (15)$$

Donde:

Ra = Fuerza de resistencia del aire

ρ = Densidad del aire

C = Coeficiente aerodinámico

S = Superficie maestra

v = Velocidad del vehículo

Tabla 5. Valores calculados de C .

Estado	Ra (experimental)	P [kg/m ³]	$S = 0,8 \text{ ab}$ [m ²]	v [km/h]	v [m/seg]	C
Con GV	2,91	1,2	0,011	100	27,27	0,58
Sin GV	3,145	1,2	0,011	100	27,27	0,64

Según los datos anteriores, el coeficiente aerodinámico mejora en aproximadamente 9% al implementar los generadores de vórtices, pues existe disminución en la resistencia del aire.

Finalmente, se imprime el prototipo de generador de vórtice tipo Airtab (Airtab, 2023) con los parámetros indicados en la *Tabla 6*:

Tabla 6. Parámetros de impresión del PLA.

Parámetro	Unidad	Valor
Temperatura de fusión PLA	°C	200
Temperatura de base	°C	50
Velocidad de avance	mm/seg	50
Relleno	%	50
Espesor por capa	mm	0,2
Tiempo de impresión	h	5



Figura 6. Airtab impreso en 3D.

Conclusiones

La ubicación de los generadores de vórtice constituyen un punto significativo para mejoramiento de las condiciones aerodinámicas, por lo que, debe ir montado donde termina la sección recta del techo de vehículo para que la capa límite cubra mayor longitud.

La intensidad de turbulencia se incrementa hasta 334,76% en la sección donde se ubican los GV, logrando de esta manera mantener la capa límite de aire.

Se obtiene un $C = 0,58$ debido a la reducción de resistencia aerodinámica de la carrocería, lo que influye en la reducción de pérdidas de potencia y su consiguiente disminución en el consumo de combustible.

Se prototipa el modelo de GV airtab en un tiempo de 5h con material PLA y 50% de relleno, obteniéndose un bajo grado de rugosidad debido a que el espesor de las capas es de 0,2 mm.

Referencias

- Airtab. (12 de Enero de 2023). Airtab. Obtenido de Airtab: <https://buyairtab.com/product/black-airtab/>
- Akshoy, R. P., Anuj, J., & Firoz, A. (2019). DRAG REDUCTION OF A PASSENGER CAR USING FLOW CONTROL TECHNIQUES. *International Journal of Automotive Technology*, 397–410.
- Autocasión. (12 de Enero de 2013). Obtenido de Autocasión: <https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/que-es-un-coche-targa>
- Bahte, K. J. (2007). Finite element method. *Wiley encyclopedia of computer science and engineering*.
- Baldacchino, D., Ferreira, C., & De Tavernier, D. (2018). Experimental parameter study for passive vortex generators on a 30% thick airfoil. Obtenido de RESEARCHGATE: https://www.researchgate.net/publication/324270439_Experimental_parameter_study_for_passive_vortex_generators_on_a_30_thick_airfoil

- Chen, X., & Liu, Y. (2015). Finite Element modeling and simulation with ANSYS Workbench. Boca Raton, FL 33487-2742: Taylor & Francis Group.
- Frías Valero, E. (2004). Estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de elementos finitos. Departamento de Ingeniería Eléctrica. UPC.
- Harun , C., Hazim , M., Abdulkadir , A., Iftekhar , K., Firoz , A., & Simon , W. (2013). A study on aerodynamic drag of a semi-trailer truck. Procedia Engineering , 201-205.
- Iyer, G. R., & Yavuzkurt, S. (1999). Comparison of low Reynolds number k-E models in simulation of momentum and heat transport under high free stream turbulence. International Journal of Heat and Mass Transfer, 723-737.
- km77. (2199-2023). km77. Obtenido de km77: <https://www.km77.com/coches/porsche/911/2020/targa/targa-4s/911-targa-4s/datos>
- Lam, C., & Bremhorst, K. (1981). A Modified Form of the k- ϵ Model for Predicting Wall Turbulence. ASME, 456-460.
- Queralt, M. (2017). Diseño de un generador de vórtices. Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- Selvi Rajan, S., Harikrishna, P., Senthilkumar, S., & Parammasivam, K. (2013). Aerodynamic Drag Reduction on a Sedan Car by Provision of Vortex Generators through Wind Tunnel Studies. Obtenido de Researchgate: <https://www.researchgate.net/publication/267869529>
- Sobachkin, A., & Dumnov, G. (2014). Base numérica de CFD integrada en CAD. Solidworks.
- Ultimaker. (16 de Mayo de 2017). Ficha de datos técnicos PLA. Obtenido de <https://ultimaker.com/download/67583/TDS%20PLA%20v3.011-spa-ES.pdf>
- Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). Biodegradable Polymers. Material, 307-344.
- XYZ PRINTING. (15 de Marzo de 2023). XYZ PRINTING. Obtenido de XYZ PRINTING: <https://www.xyzprinting.com/es-ES/product/da-vinci-pro>