

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN AERODINÁMICA DE UN VEHÍCULO SOLAR

Sebastian Careno^a, Ignacio Peralta^a, Bruno Storti^a y Alejandro Albanesi^{a,b}

^a*Laboratorio de Flujometría (FLOW) del Departamento Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe
Lavaise 610, 3000 Santa Fe, Argentina
flow@frsf.utn.edu.ar, <http://www.frsf.utn.edu.ar>*

^b*Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC)
Universidad Nacional del Litoral - CONICET
Guemes 3450, 3000 Santa Fe, Argentina
aalbanes@santafe-conicet.gov.ar, <http://www.cimec.org.ar>*

Palabras clave: CFD, Aerodinámica, Turbulencia, Vehículos Solares.

Abstract. La potencia necesaria para impulsar un vehículo depende de una serie de pérdidas, y entre las más relevantes, podemos mencionar la originada por la rodadura de los neumáticos, por el ángulo de comba y avance de los mismos, la pérdida por transmisión, y las pérdidas aerodinámicas. Todas aumentan a medida que aumenta la velocidad del vehículo.

Mientras que las pérdidas por rodadura y transmisión aumentan en forma aproximadamente lineal con la velocidad, las pérdidas aerodinámicas lo hacen en forma cúbica, y por esta razón constituyen la principal carga a vencer por el motor de cualquier vehículo que se mueva a alta velocidad.

El objetivo de este trabajo es optimizar la carrocería de un vehículo solar para competir en la World Solar Challenge (WSC). Respetando las restricciones de tamaño, visualización, habitabilidad y seguridad impuestas por el reglamento de la WSC, se diseñaron perfiles aerodinámicos óptimos para la cabina, carrocería, y pasaruedas. Estos perfiles se lograron haciendo uso de modelos CFD de volúmenes finitos, y modelos adecuados de turbulencia.

1 INTRODUCCION

En el año 2013, el Grupo Tecnológico Automotor (GTA) de la UTN Regional Santa Fe encaró el diseño y construcción de un vehículo para participar en la World Solar Challenge 2015, una competencia de vehículos propulsados por energía solar que se desarrolla en Australia entre las ciudades de Darwin y Adelaide, recorriendo 3000 km en un período de tres días (WSC, 2013). Los elementos principales de estos vehículos son el motor eléctrico, el pack de baterías, el instrumental electrónico, y una carrocería liviana fabricada en materiales compuestos que está recubierta con paneles solares.

La potencia necesaria para impulsar un vehículo es función de una serie de pérdidas, y entre las más relevantes podemos mencionar la originada por la rodadura de los neumáticos (donde interviene el ángulo de comba y avance de los mismos) y las pérdidas aerodinámicas. Todas aumentan a medida que aumenta la velocidad del vehículo. No obstante, las pérdidas por rodadura tienen dependencia lineal con la velocidad mientras que las pérdidas aerodinámicas tienen dependencia cúbica, y constituyen la principal carga a vencer por el motor de cualquier vehículo que se mueva a alta velocidad. Además, el comportamiento aerodinámico de un vehículo influye en su estabilidad direccional, y en su dinámica en general. El objetivo de este trabajo es presentar los estudios aerodinámicos realizados para diseñar la carrocería de un vehículo solar.

El fin del estudio aerodinámico es cuantificar las fuerzas de resistencia al avance (*drag*), de sustentación (*lift*), y los campos de presión que actúan sobre el vehículo, junto con otras variables más cualitativas tales como líneas de corriente, el desprendimiento de vórtices y capa límite (Katz, 1995). Estos estudios se han realizado históricamente mediante un túnel de viento y técnicas de ensayo en ruta, con el inconveniente de que insumen gran tiempo de desarrollo, tienen un alto costo en sensores y modelos, y requieren un esfuerzo humano importante (Hucho y Ahmed, 1987). Por esta razón, ha crecido mucho el uso de los métodos computacionales para simular los ensayos aerodinámicos mediante software de dinámica de fluidos computacional (CFD). Además, el uso de CFD facilita la cuantificación de variables difíciles de medir en forma experimental y que requieren gran cantidad de sensores. El análisis por CFD es el procedimiento utilizado en este trabajo, mediante el software comercial Ansys CFX 10.

2 PÉRDIDAS AERODINÁMICAS

La potencia necesaria para impulsar un vehículo a una velocidad V (suponiendo que se desprecia el viento) se calcula mediante la expresión (McBeath, 2011):

$$P = mgC_rV + \frac{1}{2}\rho C_dAV^3 + Perd_{trans} + Perd_{motor} \quad (1)$$

donde C_r es el coeficiente de rodadura de los neumáticos, m es la masa del vehículo, g es la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad del aire a temperatura ambiente, A es el área frontal del vehículo, C_d es el coeficiente aerodinámico del vehículo, $Perd_{trans}$ son las pérdidas por la transmisión (incluyendo los rodamientos de cada rueda), y $Perd_{motor}$ son las pérdidas debidas a la eficiencia del motor eléctrico.

El primer término de la Ecuación (1) es la pérdida por rodadura, depende de la masa del vehículo y del coeficiente de rodadura de los neumáticos, y se observa que tiene dependencia lineal con la velocidad V . El segundo término constituye la pérdida aerodinámica, es función de la geometría del vehículo y de su área frontal, y tiene dependencia cúbica con la velocidad V . El tercer y cuarto término son las pérdidas debido a la transmisión y al rendimiento del motor respectivamente, y son despreciables frente a los otros términos para este tipo de vehículos (los motores tienen alto rendimiento, y no utilizan transmisión).

La dependencia lineal y cúbica de las pérdidas por rodadura y aerodinámica respectivamente, implica que a baja velocidad la potencia necesaria para impulsar un vehículo depende casi exclusivamente de la fricción por rodadura, mientras que a alta velocidad la potencia total depende casi exclusivamente de las pérdidas aerodinámicas.

2.1 Coeficiente aerodinámico

El coeficiente aerodinámico es un número adimensional que cuantifica la resistencia al avance de un cuerpo rodeado de flujo, y depende de la rugosidad superficial como así también de la geometría del cuerpo. Se define como

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho AV^2} \quad (2)$$

donde F_d es la componente de la fuerza de arrastre proyectada sobre la dirección del flujo (Hucho y Ahmed, 1987). Este coeficiente es función del número de Mach:

$$M = \frac{V}{a} \quad (3)$$

siendo a la velocidad del sonido en el fluido (para el aire a 20°C es aproximadamente 343.2 m/s). Para flujos incompresibles (flujos donde el número de Mach es inferior a 1/3), el coeficiente C_d es independiente de la velocidad y del número de Reynolds Re

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (4)$$

donde L es la longitud del vehículo y μ la viscosidad dinámica (McBeath, 2011), y por lo tanto C_d puede considerarse como una constante (Hirsch, 2007). En lo que respecta a la geometría del cuerpo, el coeficiente C_d se puede disminuir manteniendo la capa límite solidaria a la superficie del cuerpo en la mayor extensión posible, lo cual se traduce en disminuir el desprendimiento de la capa límite (Schlichting y Gersten, 2000).

2.2 Consideraciones de diseño

El vehículo solar que se presenta en este trabajo tiene ciertas características que son obligatorias de acuerdo al reglamento de la competencia, y otras que son de libre elección. Las de mayor relevancia para el problema aerodinámico son:

- Largo máximo: 4500 mm. Ancho máximo: 1800 mm. Alto máximo: 1800 mm.
- Tracción trasera. 2 motores iguales con 92% de rendimiento. Potencia total: 4 kW.
- 4 neumáticos ubicados de forma simétrica a los ejes principales. $C_r = 0.015$.
- Ángulo máx. del asiento: 25° respecto a la vertical. Amplitud del movimiento: 65°.
- Separación entre el pavimento y los ojos del piloto: mínima de 700 mm.
- Peso total (vehículo, piloto, baterías y equipos): 340 kg.

El campo de visión reglamentario impone restricciones importantes en la ubicación del piloto y de la cabina, y sobre la geometría del vehículo (en particular en los bordes y aristas). Este campo se observa en la Figura 1.

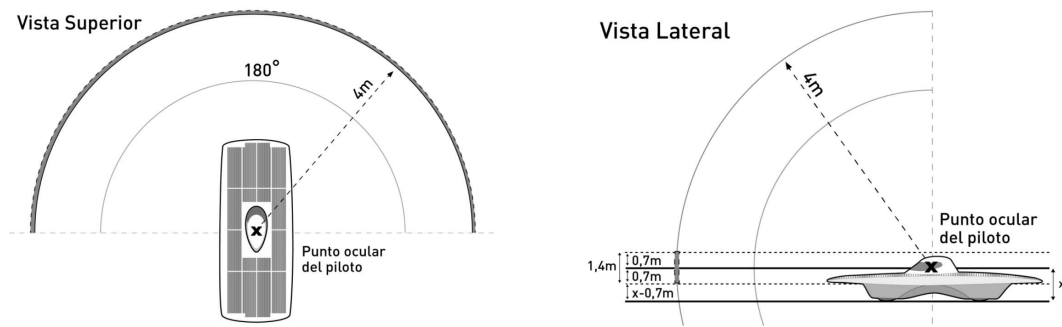


Figure 1: Campo de visión reglamentario del WSC.

2.3 Meta del estudio aerodinámico

Para especificar la meta en el diseño de la carrocería, se analizaron los tiempos y velocidades promedio del vehículo ganador de la edición 2011 de la competencia WSC, el vehículo Tokai Toray de la Universidad de Japón, que tuvo un promedio de velocidad de 24.1 m/s (87 km/h) durante los tres días de competencia.

Para poder superarlo, se planteó la necesidad de circular a 25 m/s (90 km/h), utilizando a pleno un sólo motor (con potencia de 2kW). Reemplazando estos valores característicos en la Ecuación (1), podemos obtener el coeficiente aerodinámico máximo que debe tener el vehículo. Es importante destacar que el valor a determinar en la Ecuación (1) es el producto $C_d A$. Para el coeficiente de rodadura de los neumáticos C_r se adoptó el valor de los neumáticos de motos (0.010), ya que son los que se utilizan típicamente en los motores masa. En la Tabla 1 se resumen los valores utilizados para calcular el producto $C_d A$.

Variable	Valor	Comentario
V	25 m/s	Según análisis de velocidad.
P	2000 W	Operando con un sólo motor.
m	340 kg	Peso total del vehículo.
g	9.81 m/s ²	—
C_r	0.010	Valor promedio neumático de calle.
ρ	1.2047 kg/m ³	Densidad a 20°C.
$Perd_{motor}$	160 W	8% de la potencia (Rend. 92%).
$Perd_{trans}$	0	El motor opera sin transmisión.

Table 1: Valores y parámetros utilizados para calcular el valor de $C_d A$.

Con estos valores, el producto $C_d A$ del vehículo debe ser menor o igual a 0.107 m² para circular a 25 m/s (90 km/h), utilizando a pleno un sólo motor. Para nuestro prototipo $V = 25$ m/s y $a = 343.2$ m/s, y en consecuencia el número de Mach de la Ecuación (3) es $M = 0.073$. Por lo tanto, el flujo resulta incompresible, y el C_d se puede suponer constante en la Ecuación (1).

2.4 Malla y condiciones de contorno

Para discretizar el dominio se utilizó una malla no estructurada de elementos tetraédricos. Por la simetría que presenta la carrocería, se ha modelado solamente la mitad del vehículo. Siendo L el largo del vehículo, el dominio computacional tiene longitud 7L (*streamwise*), ancho L (*spanwise*) y alto L (*stream-normal*), Figura 2. Se realizó un análisis de la influencia del tamaño del dominio sobre los valores del $C_d A$, y se determinó una diferencia máxima del

3% entre el dominio con dimensiones $7L \times L \times L$ y otro de $4L \times 0.5L \times L$, por lo cual se concluye que los dominios de mayores dimensiones tiene baja influencia sobre los resultados, y aumentan el tiempo de cálculo innecesariamente. Se utilizaron seis capas de elementos de pequeña escala (tamaño máximo 10 mm) sobre la carrocería para capturar los efectos viscosos generados por el desprendimiento de la capa límite, Figura 3. La malla final tiene 3.200.000 elementos tetraédricos y 550.000 nodos.

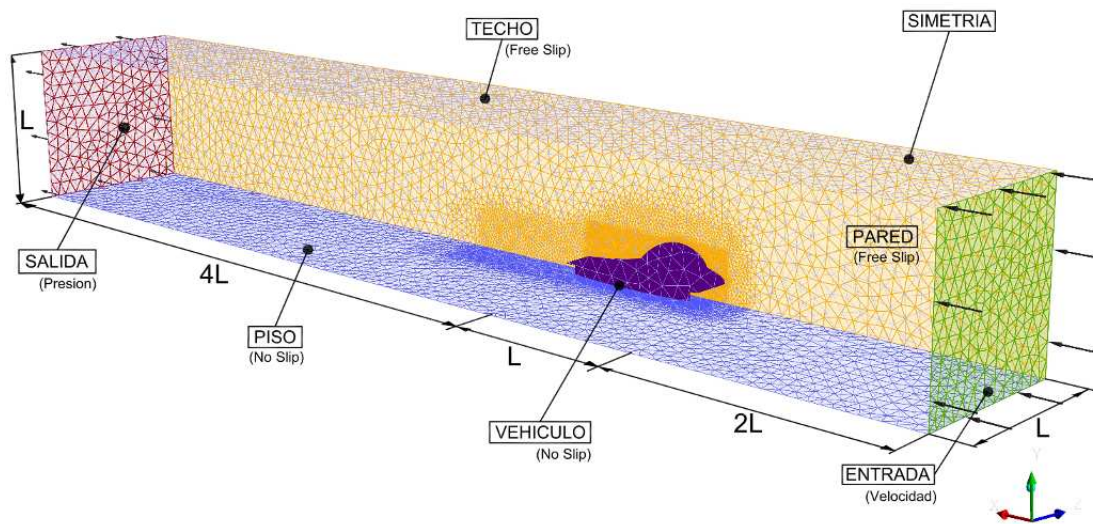


Figure 2: Malla y condiciones de contorno del dominio computacional.

Respecto a las condiciones de contorno, se considera una entrada con velocidad de 25 m/s, densidad $\rho = 1.2047 \text{ kg/m}^3$, viscosidad cinemática $\nu = 1.45 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, y viento frontal nulo. Se utilizó una ley de pared free-slip para el techo y las paredes del dominio, mientras que para la carrocería y el piso del dominio la ley de pared es del tipo no-slip. En la salida, se considera que el valor de la presión es la atmosférica. La malla y las condiciones de contorno se presentan en la Figura 2.

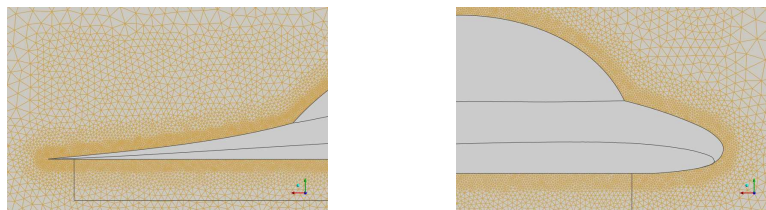


Figure 3: Detalles de la malla en la capa límite del vehículo: parte trasera (izquierda), y parte delantera (derecha).

2.5 Modelado matemático y numérico

Las ecuaciones de Navier-Stokes (ecuaciones diferenciales parciales acopladas, no lineales y de segundo orden) restringidas a un fluido viscoso e incompresible, representan el modelo matemático más apropiado para un flujo viscoso con efectos compresibles despreciables. Su resolución numérica se realiza con el modelo RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), un método de flujo viscoso en el cual se promedian las variables en el tiempo y se resuelve el problema para el flujo medio (Hirsch, 2007) mediante el método de los volúmenes finitos (FVM). En

este trabajo se utilizó el software comercial Ansys CFX 10 (ANSYS-CFX, 2005a). Es importante remarcar que la aproximación a la solución mediante RANS depende fundamentalmente del modelo de turbulencia utilizado.

2.6 Modelo de turbulencia

Para modelar la turbulencia se utilizó el modelo SST (ANSYS-CFX, 2005b), un modelo de dos ecuaciones basado en la hipótesis de Boussinesq. Numerosos trabajos han demostrado que el modelo $k-\epsilon$, el más popular entre los de dos ecuaciones por robustez y bajo costo computacional, no es capaz de capturar correctamente la separación del flujo en modelos turbulentos cuando la capa límite no está en equilibrio. En cambio, SST utiliza el modelo $k-\omega$ en las paredes del cuerpo, y el modelo $k-\epsilon$ en el seno del fluido (Wilcox, 1994), y es el recomendado para los estudios aerodinámicos. En SST se define la viscosidad cinemática turbulenta como (Menter et al., 2003)

$$\nu_T = \frac{a_1 \kappa}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (5)$$

donde la constante $a_1 = 0.31$, κ es la energía cinética turbulenta, ω es la tasa de disipación de energía cinética, S es una medida invariante del tensor de deformaciones, y F_2 es una función de combinación definida por:

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{\kappa}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (6)$$

siendo la constante $\beta = 0.09$, y la distancia adimensional (determinada según la velocidad del fluido en la celda actual) entre la pared y el primer nodo de la malla, y ν la viscosidad (no turbulenta) en el fluido.

3 VARIANTES DE DISEÑO

A partir de los requerimientos del reglamento, se logró un modelo base con un valor de $C_d A = 0.1112$, Figura 4. Posteriormente se estudiaron diversas modificaciones geométricas que respetaban el reglamento pero que podían reducir la resistencia aerodinámica. A continuación presentamos cada una de ellas, junto con la evolución del parámetro $C_d A$.

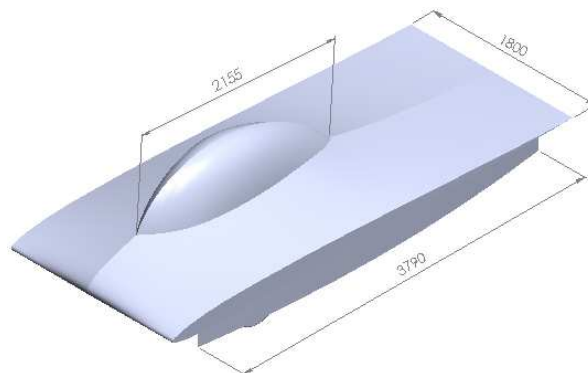


Figure 4: Modelo base de los análisis aerodinámicos, con parámetro $C_d A = 0.1112$.

3.1 Curvatura del panel

Se analizó la distancia (offset) entre la curva central y lateral del panel solar, como una medida de su curvatura, Figura 5 (izquierda). El parámetro C_dA disminuye cuando lo hace el offset (porque disminuye el área frontal), Figura 5 (derecha).

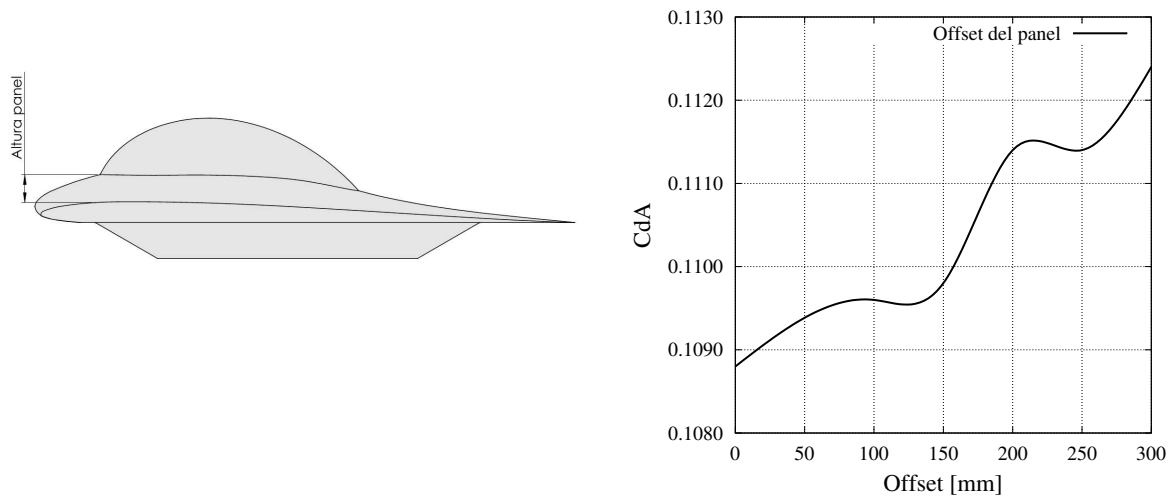


Figure 5: Curvatura del panel solar (izquierda), y variación del parámetro C_dA según la curvatura (derecha).

3.2 Ubicación de la carlinga

Otra variante analizada fue la ubicación de la carlinga en sentido longitudinal del vehículo, medida desde la parte frontal, Figura 6 (izquierda). Este análisis mostró gran influencia en los desprendimientos del flujo sobre la carrocería. La ubicación óptima fue de 600mm, figura 6 (derecha).

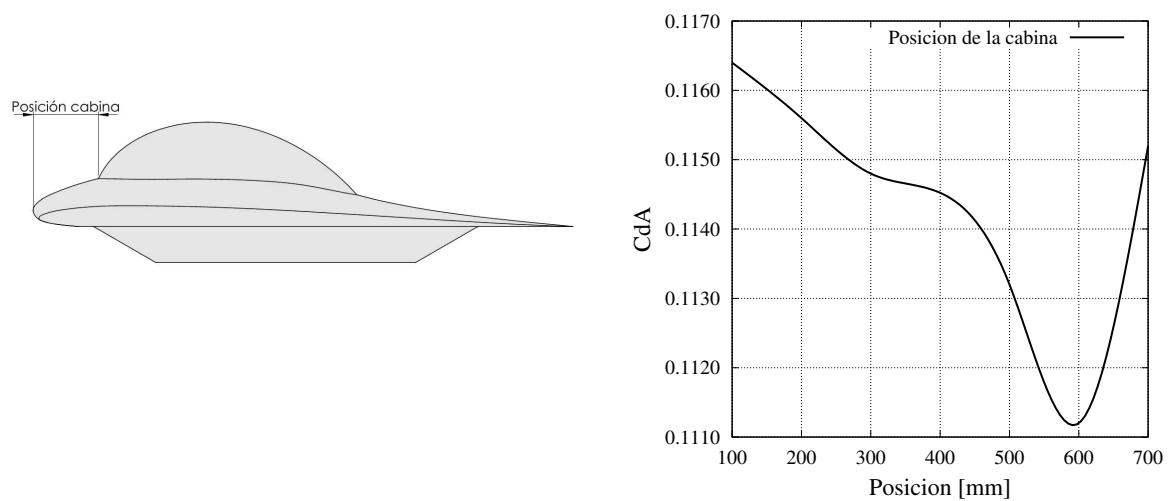


Figure 6: Ubicación de la carlinga (izquierda), y variación del del parámetro C_dA según la posición (derecha).

3.3 Despeje al piso

Se determinó la influencia del despeje al piso, Figura 7 (izquierda). Un vehículo bajo tiene área frontal reducida y gran estabilidad por que su centro de gravedad es bajo también. Se simularon despejes de 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 mm, Figura 7 (derecha).

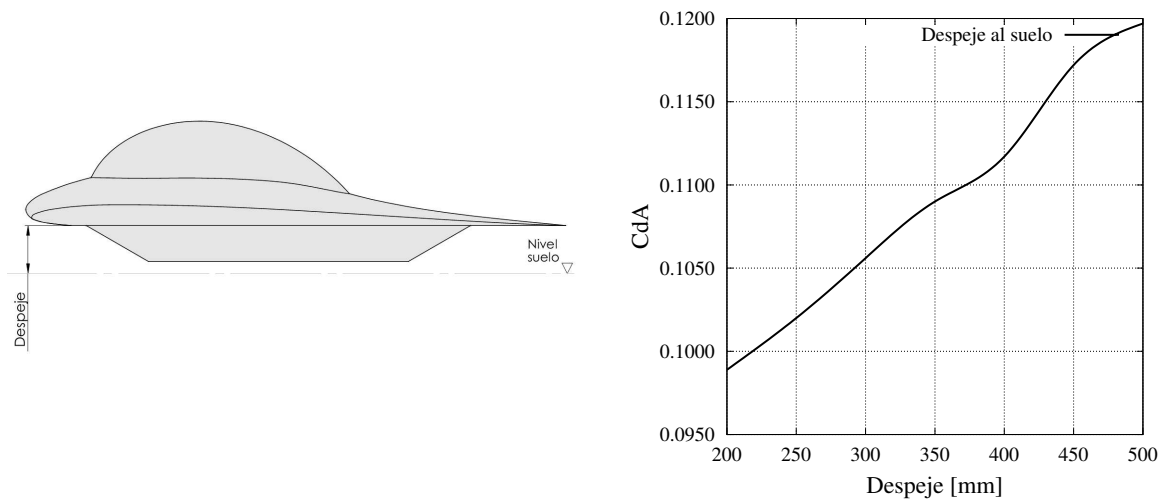


Figure 7: Despeje al piso (izquierda), y variación del del parámetro C_dA según el despeje (derecha).

3.4 Largo de los pasaruedas

Se estudió la influencia del largo de los pasaruedas sobre el parámetro C_dA , Figura 8 (izquierda). Un pasaruedas más largo permite configurar al vehículo con mayor distancia entre ejes, lo cual mejora la estabilidad. Sin embargo, también aumenta la *superficie mojada*. Se simularon largos de 3000, 3200, 3400, 3600 mm, Figura 8 (derecha).

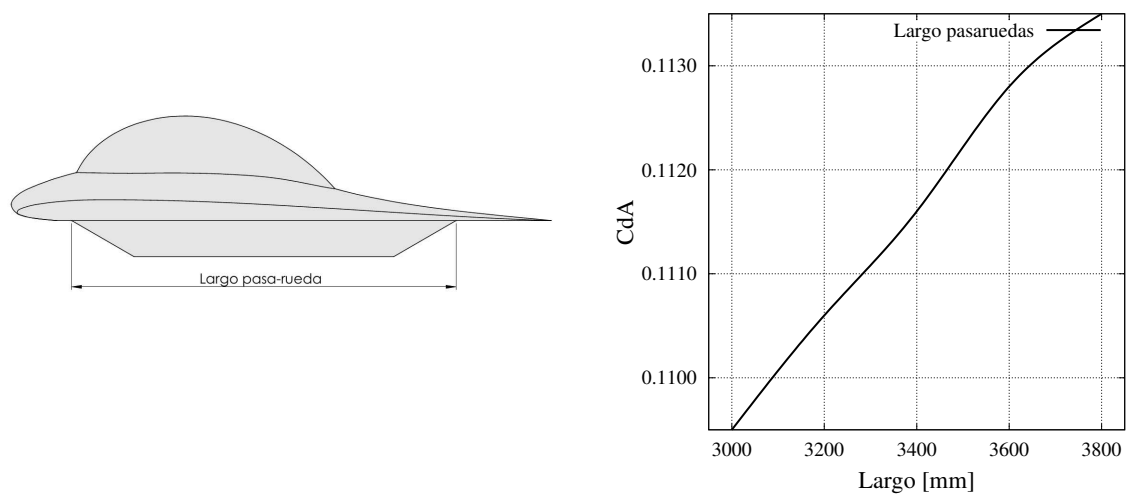


Figure 8: Largo de los pasaruedas (izquierda), y variación del del parámetro C_dA según el largo (derecha).

3.5 Separación de los pasaruedas

La separación de los pasaruedas influye en la dinámica del vehículo porque permite aumentar la trocha, mejorando la estabilidad, Figura 9 (izquierda). Se simularon separaciones de 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, y 1450 mm, Figura 9 (derecha).

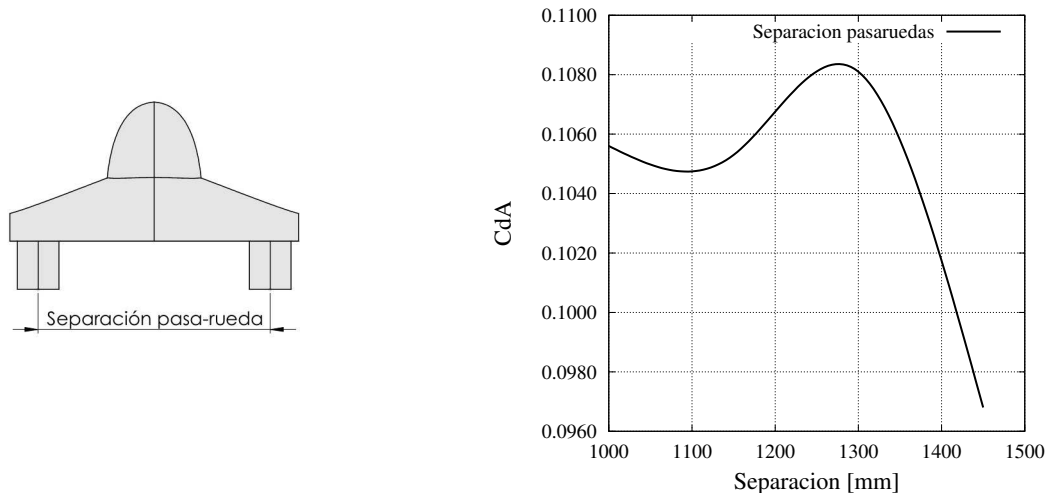


Figure 9: Separación de los pasaruedas (izquierda), y su influencia sobre el parámetro C_dA (derecha).

Si los pasaruedas están muy cerca el aire se estrangula, y esta situación presenta un C_dA elevado. Sin embargo, al aumentar la separación se presenta un máximo local, asociado a la porción de carrocería exterior ubicada por encima del pasaruedas (se generan vórtices que aumentan las pérdidas aerodinámicas).

3.6 Ángulo de ataque y fuga de los pasaruedas

Se analizó la variación de la resistencia aerodinámica al modificar los ángulos de ataque y fuga de los pasaruedas, α y β de la Figura 10 respectivamente. Se simularon valores de α y β de 10, 20, 30, 40, 50 y 60°, Figura 11. En ambos casos el ángulo óptimo fue de 60°.

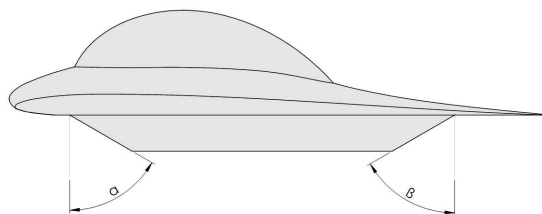


Figure 10: Ángulo de ataque (α) y fuga (β) los pasaruedas.

4 DISEÑO FINAL

Se consideraron aquellas alternativas que cumplían el reglamento de la competencia (WSC, 2013) y que tenían además el menor C_dA . Posteriormente se las combinó entre si para lograr el

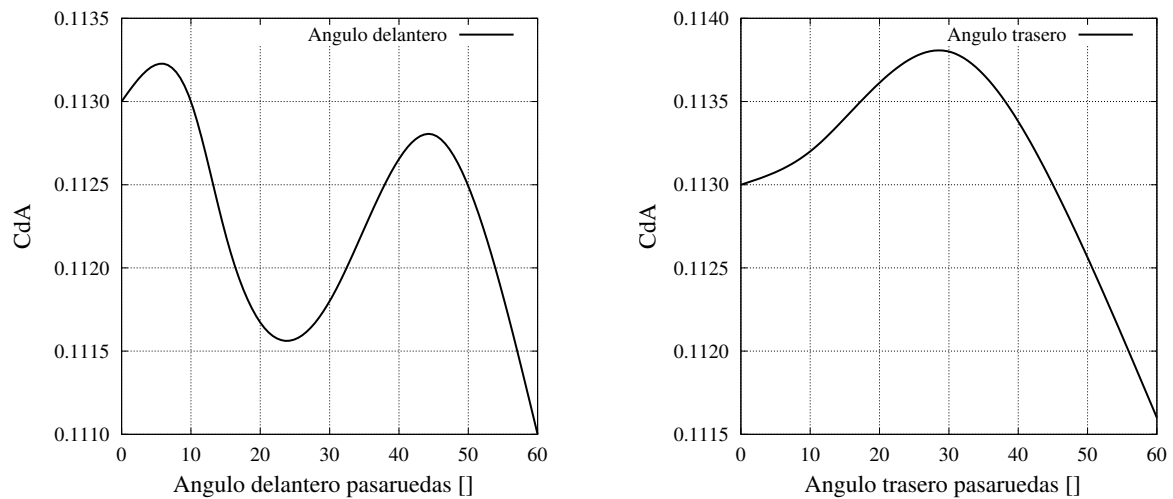


Figure 11: Variación del del parámetro C_dA en función de α (izquierda), y β (derecha).

modelo final que posee $C_dA = 0.08670$, lo cual representa una mejora del 17.7% on respecto al modelo base. Sus características geométricas adoptadas se presentan en la Tabla 2.

Variable	Valor
Largo total	4500 mm
Ancho total	1800 mm
Alto total	900 mm
Offset del panel	150 mm
Ubicación de la carlinga	600 mm
Despeje al piso	350 mm
Largo de los pasaruedas	3200 mmm
Separación pasaruedas	1450 mm
Ángulos de ataque y fuga pasaruedas	60°

Table 2: Características geométricas del vehículo final con $C_dA = 0.08670$.

Las gráficas de velocidad y presión en el plano de simetría del dominio se presentan en Figuras 12 y 13 respectivamente.

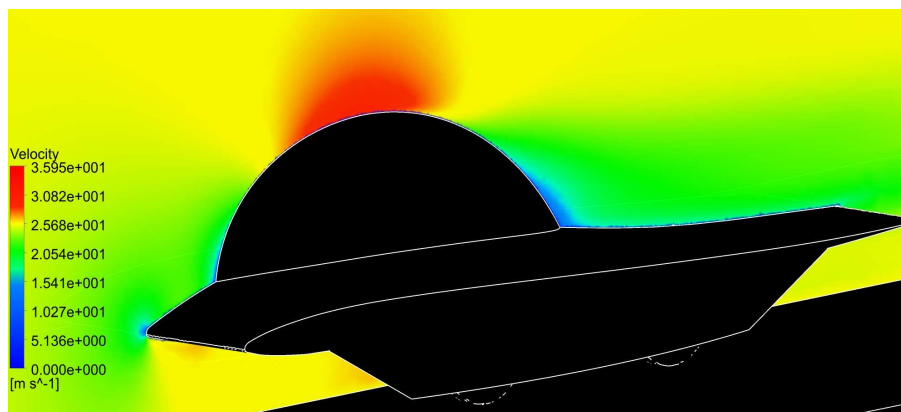


Figure 12: Velocidad en el plano de simetría del dominio.

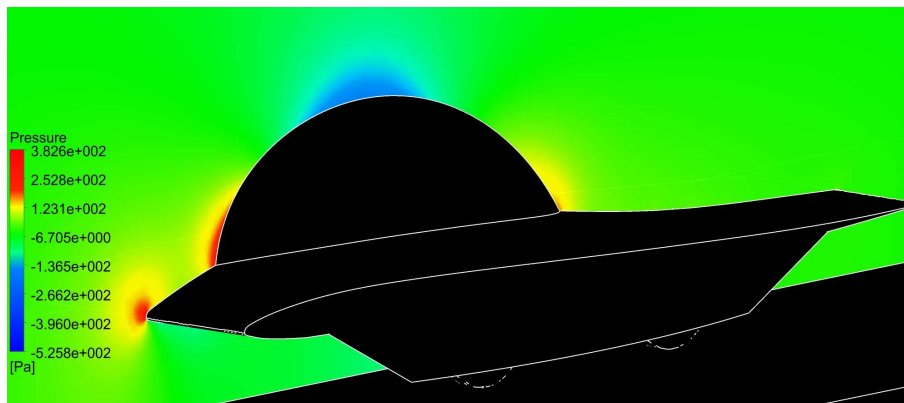


Figure 13: Presión en el plano de simetría del dominio.

4.1 Líneas de flujo

En la Figura 14 se presentan las líneas de flujo que rodean el vehículo, donde cada una de ellas resulta de seguir la trayectoria de una partícula desde que ingresa hasta que sale del dominio.

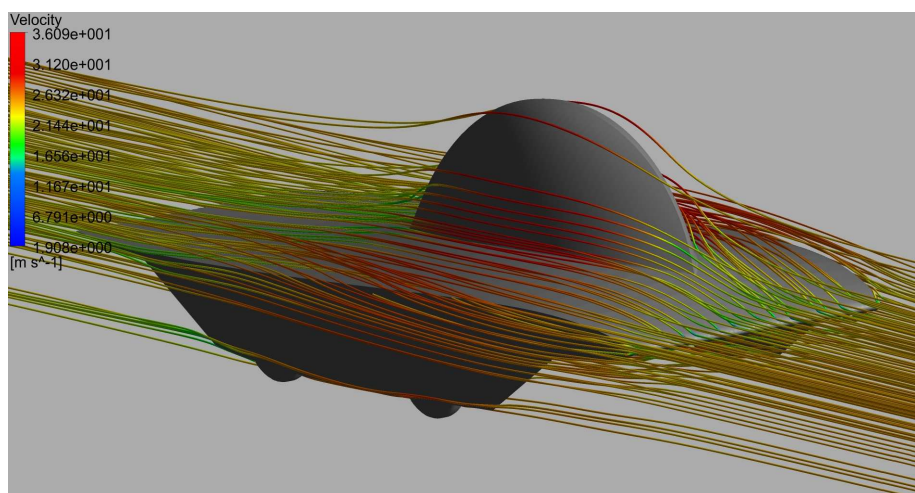


Figure 14: Líneas de flujo que rodean el vehículo.

Están relacionadas con la distribución de presión, y cuando las líneas de flujo se curvan, la presión aumenta en sentido normal a las líneas de flujo, en dirección saliente desde el centro de curvatura. Para un flujo no viscoso, la curvatura de las líneas de presión se determinan mediante la Ecuación (7)

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \frac{V^2}{r} \quad (7)$$

donde p es la presión, n es la coordenada normal a la línea de flujo (dirección hacia donde aumenta la presión), y r su curvatura (Shapiro, 1963). Esto se puede apreciar con claridad en la Figura 15 (hay un cambio en la curvatura de las líneas de flujo en la región aguas arriba y aguas abajo de la carlinga, y sobre la carlinga también, que se corresponden con cambios en la presión).

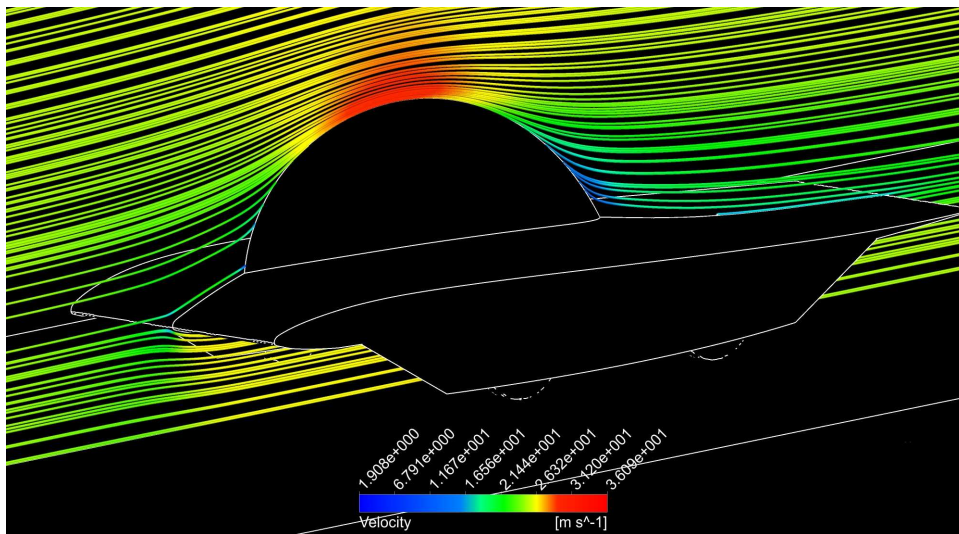


Figure 15: Curvatura de las líneas de flujo.

4.2 Coeficiente de presión

Para medir las variaciones de presión se utiliza el coeficiente de presión C_p , un número adimensional que describe las presiones relativas dentro de un flujo, y se define como el cociente entre la presión que actúa en un punto del dominio y la presión en el flujo libre no perturbado

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad (8)$$

siendo V_∞ y p_∞ la velocidad y presión del flujo no perturbado respectivamente (Anderson, 2010). Si $C_p = 0$ la presión es la misma que en el flujo no perturbado, si $C_p = 1$ indica que hay un punto de estancamiento, y si $C_p < 0$ indica que la presión del flujo es menor que la del flujo no perturbado.

En la Figura 16 se observa el campo de presión que actúa sobre la carrocería del vehículo. Es posible determinar los puntos de estancamiento (regiones en color rojo en el panel y carlinga), zonas donde la presión es menor a la del dominio no perturbado y por ende la velocidad local del fluido es mayor a la media (región azul sobre la carrocería y carlinga), y regiones donde la presión es aproximadamente igual a la del dominio no perturbado (regiones de color verde claro sobre carrocería y carlinga).

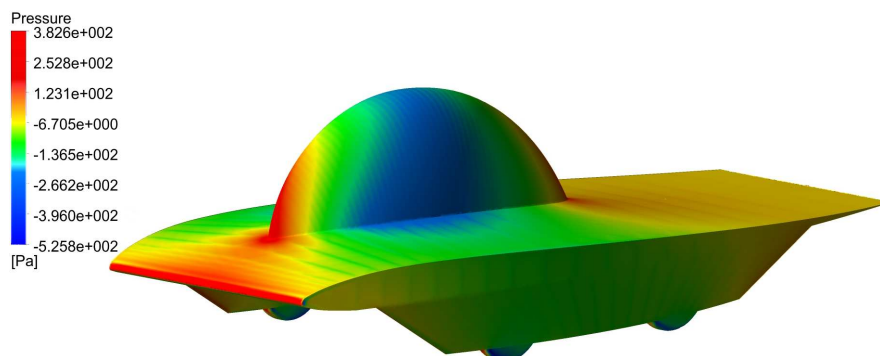


Figure 16: Campo de presión sobre la carrocería.

La Figura 17 es la representación gráfica del coeficiente de presión C_p en función de la coordenada longitudinal del vehículo, donde la curva de color rojo y azul representan este coeficiente en la parte superior e inferior de la carrocería respectivamente. Esto permite determinar rápidamente las zonas de carga aerodinámica. Es interesante notar que existe una relación entre la pendiente del C_p con el desprendimiento de la capa límite sobre la carrocería: cuando la pendiente es positiva existen desprendimientos, mientras que cuando la pendiente es negativa la capa límite vuelve a adherirse a la superficie del vehículo.

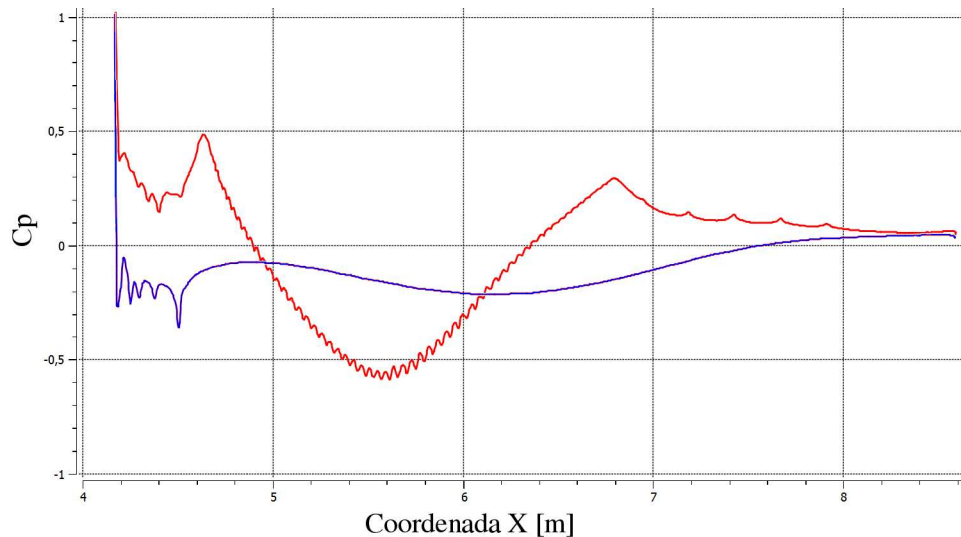


Figure 17: Coeficiente de presión del vehículo: rojo (arriba) y azul (debajo).

4.3 Energía cinética turbulenta

La energía cinética turbulenta (ECT) es la energía cinética específica (por unidad de masa) promediada en el tiempo, y es la energía contenida en los vórtices de un flujo turbulento. Es en esencia la cantidad de energía cinética del flujo medio que ha sido transformada en vórtices ante la presencia de desprendimientos. Cuanto mayor sea la ECT, mayor es la energía contenida en los vórtices, Figura 17.

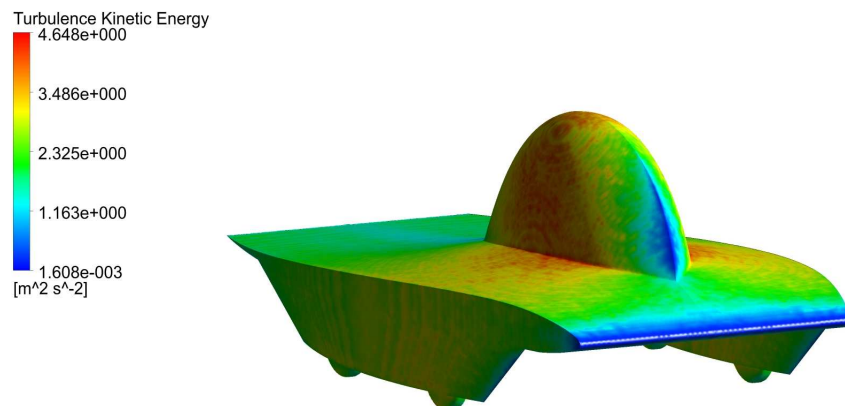


Figure 18: Energía cinética turbulenta.

Cuando se produce el desprendimiento en un flujo, la energía cinética del flujo medio se transfiere a través de la ECT a vórtices de gran escala, que a su vez transfieren esta energía

en forma de ECT a vórtices de media escala, hasta que finalmente esta energía es disipada por vórtices de pequeña escala donde los efectos viscosos superan a la energía cinética.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los estudios aerodinámicos realizados en CFD para diseñar la carrocería de un vehículo solar para participar en la competencia World Solar Challenge. A partir de un modelo base que cumplía con el reglamento de la competencia, se realizaron diversas simulaciones por CFD de modelos preliminares con distintas configuraciones con el fin de reducir la resistencia aerodinámica. Estos estudios se realizaron con el software comercial ANSYS CFX-10.0, con un modelo de turbulencia tipo SST.

El modelo final alcanzado posee $C_dA = 0.08670$, lo que representa una mejora del 14% comparado al objetivo propuesto, y una mejora del 17.7% con respecto al modelo base.

El trabajo a futuro consistirá en modelar vientos frontales y laterales, introducir leyes de rugosidad de pared, e incluir la rotación de los neumáticos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con financiación de la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe (UTN-FRSF), y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

REFERENCES

- J. D. Anderson. *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math., 2010.
- ANSYS-CFX. *The CFX approach to turbulence modeling. Accurate and effective turbulent flow simulations*. ANSYS Incorporated, 2005a.
- ANSYS-CFX. *Innovative Turbulence Modelling: SST Model in ANSYS CFX*. ANSYS Incorporated, 2005b.
- C.. Hirsch. *Numerical computation of internal and external flows. The fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. John Wiley and Sons, Ltd., 2007.
- Wolf-Heinrich. Hucho y Syed R. Ahmed. *Aerodynamics of road vehicles : from fluid mechanics to vehicle engineering*. Butterworths London ; Boston, 1987.
- Joseph Katz. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Robert Bentley, 1995.
- Simon McBeath. *Competition Car Aerodynamics: A Practical Handbook*. Haynes Publications, Inc, 2011.
- F. R. Menter, M. Kuntz, y R. Langtry. Ten years of industrial experience with the sst turbulence model. *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, pages 1–8, 2003.
- H. Schlichting y K. Gersten. *Boundary-Layer Theory*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg., 2000.
- A. H. Shapiro. *Pressure fields and Fluid acceleration*. Massachusetts Institute of Technology., 1963.
- D. Wilcox. *Turbulence Modeling for CFD*. DWC Industries, La Cañada, California, 1994.
- WSC. Regulations for the 2013 world solar challenge. Available via <http://www.worldsolarchallenge.org>, pages 1–43, 2013.