



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Energía: Generación, Gestión y Uso Eficiente.

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**“Simulación de la aerodinámica de un  
vehículo en banco de rodillos usando  
FIRE”**

Autor:

Sergio Manchado Bombín

Tutor:

Dr. Andrés Melgar Bachiller (Universidad de Valladolid)

Valladolid, 19 de Julio de 2017



## **RESUMEN**

La simulación del flujo de aire alrededor de un coche con ayuda de una soplante se hace para refrigerar las diferentes partes del vehículo cuando éste se encuentra en una sala de ensayos. Las partes que se deben refrigerar dependen del tipo de test que se vaya a llevar a cabo. El objetivo de este trabajo es entender cómo varía el flujo alrededor del coche dependiendo de la soplante que se utilice para simular el movimiento de aire, y justificar que soplante es la que mejor se ajusta a los requerimientos de cada test. Para ello, el flujo de aire alrededor del coche en carretera y con la soplante se han simulado mediante la técnica de CFD. El diseño y la simulación se han realizado con el programa AVL FIRE. Los resultados más importantes han demostrado que las soplantes pequeñas son suficiente para refrigerar el radiador de manera correcta, pero para simular bien el resto de partes se necesitan soplantes con áreas mayores.

## **ABSTRACT**

The simulation of air flow around a vehicle by means of a blower is done to cool down different parts of the vehicle when it is in test cell. The parts which have to be cooled depend on the type of test to carry out. The main objective of this study is to understand how the flow around the car changes when different blowers are used to simulate the air, and justify which blower is the more suitable for each test. To study this problem, the air flows around the on-road car, and the car with different blowers in front of it are simulated employing CFD techniques. The designing of model and CFD simulations were carried out in AVL FIRE. Major findings show that small blowers are enough to effectively cool down the radiator, but bigger blowers are required to correctly simulate more parts of the car. This study should be useful on selecting the appropriate blower depending on the type of test to carry out in the test cell.



# ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	7
1.1	Introducción y justificación .....	7
1.2	Antecedentes .....	10
1.3	Objetivos .....	10
1.3.1	Objetivos específicos .....	11
1.4	Estructura de la Memoria .....	11
2	METODOLOGÍA COMPUTACIONAL .....	13
2.1	Soplantes a estudiar .....	13
2.1.1	Soplante 1 .....	13
2.1.2	Soplante 2 .....	14
2.1.3	Soplante 3 .....	15
2.1.4	Soplante 4 .....	15
2.1.5	Resumen de simulaciones realizadas .....	16
2.2	Identificación del dominio computacional .....	17
2.3	Herramientas utilizadas .....	17
2.4	Modelado de la geometría .....	18
2.5	Mallado de la geometría .....	18
2.6	Simulación en FIRE .....	20
2.6.1	Propiedades del fluido .....	21
2.6.2	Condiciones de contorno .....	21
2.6.3	Selección del modelo de turbulencia .....	22
2.6.4	Controles de solución .....	23
2.6.5	Estudio de independencia de malla .....	23
3	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	27
3.1	Coche en carretera .....	28
3.1.1	Velocidad: 130 km/h .....	28
3.1.2	Velocidad: 160 km/h .....	30
3.1.3	Velocidad: 200 km/h .....	32
3.1.4	Análisis del coche en carretera .....	34
3.2	Soplante 1 .....	35

3.2.1	Velocidad: 130 km/h .....	35
3.2.2	Velocidad: 160 km/h .....	37
3.2.3	Análisis de la soplante 1 .....	39
3.3	Soplante 2 .....	40
3.3.1	Distancia: 30 cm .....	40
3.3.2	Distancia: 60 cm .....	42
3.3.3	Análisis de la soplante 2 .....	44
3.4	Soplante 3 .....	45
3.4.1	Distancia: 30 cm .....	45
3.4.2	Distancia: 60 cm .....	47
3.4.3	Análisis de la soplante 3 .....	49
3.5	Soplante 4 .....	50
3.5.1	Velocidad: 130 km/h .....	50
3.5.2	Velocidad: 160 km/h .....	52
3.5.3	Velocidad: 200 km/h .....	54
3.5.4	Análisis de la soplante 4 .....	56
4	CONCLUSIONES .....	57
5	REFERENCIAS .....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Coche en un banco de rodillos .....	7
Figura 1.2: Distintas zonas que deben refrigerarse en un coche .....	8
Figura 1.3: Zonas que deben refrigerarse en diferentes test .....	8
Figura 1.4: (a) Área de soplante requerida para un ensayo WLTP. (b) Ejemplo de área de soplante utilizada para test de I+D .....	9
Figura 2.1: Coche dentro de la sala de ensayos con la soplante 1 .....	14
Figura 2.2: Coche dentro de la sala de ensayos con la soplante 2.....	14
Figura 2.3: Coche dentro de la sala de ensayos con la soplante 3.....	15
Figura 2.4: Coche dentro de la sala de ensayos con la soplante 4.....	16
Figura 2.5: Modelo CAD del coche .....	18
Figura 2.6: Topología de bloques de una de las mallas.....	19
Figura 2.7: Mallado de la sala con la soplante 1 .....	19
Figura 2.8: (a) Detalle del mallado de la capa límite. (b) Mallado de la superficie del coche.....	20
Figura 2.9: Contornos de velocidad [m/s] en carretera, malla fina. ....	24
Figura 2.10: Contornos de velocidad [m/s] en carretera, malla gruesa. ....	24
Figura 2.11: Contornos de velocidad [m/s] con la soplante 4, malla fina. ....	25
Figura 2.12: Contornos de velocidad [m/s] con la soplante 4, malla gruesa. ....	25
Figura 3.1: Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 130 km/h. Plano de simetría..	28
Figura 3.2: Contornos de presión [Pa] en carretera a 130 km/h. Plano de simetría. ....	28
Figura 3.3: Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 130 km/h. Bajo el coche.....	28
Figura 3.4: (a) Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 130 km/h, a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal. ....	29
Figura 3.5: (a) Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche en carretera, a 130 km/h.....	29
Figura 3.6: Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 160 km/h. Plano de simetría..	30
Figura 3.7: Contornos de presión [Pa] en carretera a 160 km/h. Plano de simetría. ....	30
Figura 3.8: Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 160 km/h. Bajo el coche.....	30
Figura 3.9: (a) Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 160 km/h, a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal. ....	31
Figura 3.10: (a) Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche en carretera, a 160 km/h.....	31
Figura 3.11: Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 200 km/h. Plano de simetría..	32
Figura 3.12: Contornos de presión [Pa] en carretera a 200 km/h. Plano de simetría. ....	32
Figura 3.13: Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 200 km/h. Bajo el coche.....	32
Figura 3.14: (a) Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 200 km/h, a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal. ....	33

Figura 3.15: Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche en carretera, a 200 km/h. .....	33
Figura 3.16: Contornos de velocidad [m/s], soplante 1 a 130 km/h. Plano de simetría.	35
Figura 3.17: Contornos de presión [Pa], soplante 1 a 130 km/h. Plano de simetría.....	35
Figura 3.18: Contornos de velocidad [m/s], soplante 1 a 130 km/h. Bajo el coche. ....	35
Figura 3.19: (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 1 a 130 km/h a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal. ....	36
Figura 3.20: Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 1 a 130 km/h.....	36
Figura 3.21: Contornos de velocidad [m/s], soplante 1 a 160 km/h. Plano de simetría.	37
Figura 3.22: Contornos de presión [Pa], soplante 1 a 160 km/h, plano de simetría.....	37
Figura 3.23: Contornos de velocidad [m/s], soplante 1 a 160 km/h. Bajo el coche. ....	37
Figura 3.24: (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 1 a 160 km/h a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal. ....	38
Figura 3.25: Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 1 a 160 km/h.....	38
Figura 3.26: Contornos de velocidad [m/s], soplante 2 a 30 cm. Plano de simetría. ....	40
Figura 3.27: Contornos de presión [Pa], soplante 2 a 30 cm. Plano de simetría. ....	40
Figura 3.28: Contornos de velocidad [m/s], soplante 2 a 30 cm. Bajo el coche. ....	40
Figura 3.29: (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 2 a 30 cm del coche a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal.....	41
Figura 3.30: Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 2 a 30 cm. ....	41
Figura 3.31: Contornos de velocidad [m/s], soplante 2 a 60 cm. Plano de simetría. ....	42
Figura 3.32: Contornos de presión [Pa], soplante 2 a 60 cm. Plano de simetría. ....	42
Figura 3.33: Contornos de velocidad [m/s], soplante 2 a 60 cm. Bajo el coche. ....	42
Figura 3.34: (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 2 a 60 cm del coche a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal.....	43
Figura 3.35: Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 2 a 60 cm. ....	43
Figura 3.36: Contornos de velocidad [m/s], soplante 3 a 30 cm. Plano de simetría. ....	45
Figura 3.37: Contornos de presión [Pa], soplante 3 a 30 cm. Plano de simetría. ....	45
Figura 3.38: Contornos de velocidad [m/s], soplante 3 a 30 cm. Bajo el coche. ....	45
Figura 3.39: (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 3 a 30 cm del coche a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal.....	46
Figura 3.40: Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 3 a 30 cm. ....	46
Figura 3.41: Contornos de velocidad [m/s], soplante 3 a 60 cm. Plano de simetría. ....	47



Figura 3.42: Contornos de presión [Pa], soplante 3 a 60 cm. Plano de simetría. ....	47
Figura 3.43: Contornos de velocidad [m/s], soplante 3 a 60 cm. Bajo el coche. ....	47
Figura 3.44: (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 3 a 60 cm del coche a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal. ....	48
Figura 3.45: Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 3 a 60 cm. ....	48
Figura 3.46: Contornos de velocidad [m/s], soplante 4 a 130 km/h. Plano de simetría. ....	50
Figura 3.47: Contornos de presión [Pa], soplante 4 a 130 km/h. Plano de simetría. ....	50
Figura 3.48: Contornos de velocidad [m/s], soplante 4 a 130 km/h. Bajo el coche. ....	50
Figura 3.49: (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 4 a 130 km/h, a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal. ....	51
Figura 3.50: Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 4 a 130 km/h. ....	51
Figura 3.51: Contornos de velocidad [m/s], soplante 4 a 160 km/h. Plano de simetría. ....	52
Figura 3.52: Contornos de presión [Pa], soplante 4 a 160 km/h. Plano de simetría. ....	52
Figura 3.53: Contornos de velocidad [m/s], soplante 4 a 160 km/h. Bajo el coche. ....	52
Figura 3.54: (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 4 a 160 km/h, a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal. ....	53
Figura 3.55: Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 4 a 160 km/h. ....	53
Figura 3.56: Contornos de velocidad [m/s], soplante 4 a 200 km/h. Plano de simetría. ....	54
Figura 3.57: Contornos de presión [Pa], soplante 4 a 200 km/h. Plano de simetría. ....	54
Figura 3.58: Contornos de velocidad [m/s], soplante 4 a 200 km/h. Bajo el coche. ....	54
Figura 3.59: (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 4 a 200 km/h, a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal. ....	55
Figura 3.60: Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 4 a 200 km/h. ....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Tabla de simulaciones de soplantes.....	16
Tabla 2.2: Propiedades del aire.....	21
Tabla 2.3: Condiciones de contorno en carretera .....	21
Tabla 2.4: Condiciones de contorno en sala .....	22
Tabla 3.1: Simulaciones llevadas a cabo .....	27
Tabla 4.1: Tabla resumen de la calidad de la simulación del flujo de cada soplante .....	58

## NOMENCLATURA

$y^+$  Distancia adimensional a la pared [-]

## Capítulo 1

---

# INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción y justificación

Una de las herramientas más importantes que poseen los fabricantes de vehículos para poder llevar a cabo pruebas de medición de emisiones, rendimiento, etc. sin tener que probar el vehículo en carretera son los ensayos en banco de rodillos. En estas instalaciones el movimiento de la carretera se simula mediante unos grandes rodillos que están en contacto con las ruedas, y el movimiento del aire se simula mediante una soplante colocada frente al coche.

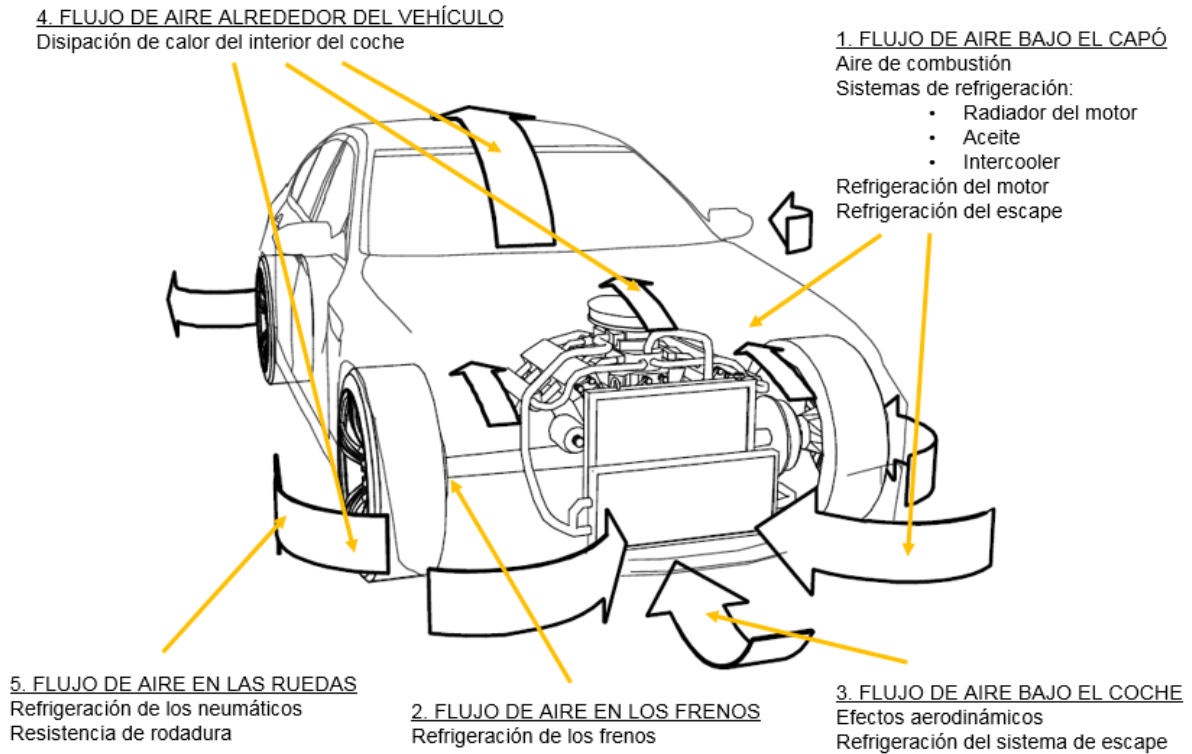


**Figura 1.1:** Coche en un banco de rodillos

Cuando un vehículo está circulando a una cierta velocidad en la carretera, el flujo de aire a su alrededor tiene gran influencia en su comportamiento, tanto en la fuerza aerodinámica que debe vencer, como en la refrigeración de sus componentes (Jama, et al., 2004).

Por una parte, el vehículo sufrirá una fuerza aerodinámica debida al aire que deberá ser compensada por el motor. Por otra parte, la velocidad del aire tiene una gran influencia en el intercambio de calor con el aire circundante. Este intercambio de calor es crucial para refrigerar ciertas partes del vehículo y tiene una fuerte influencia en el rendimiento del vehículo.

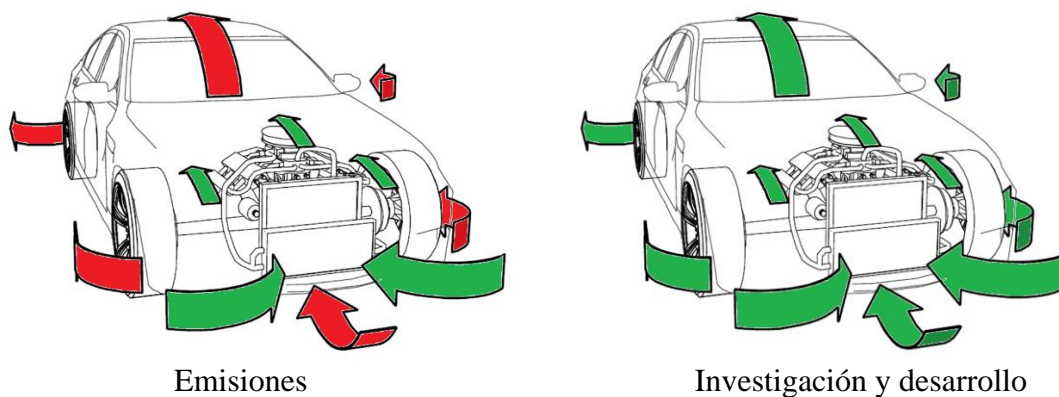
Se puede dividir el aire circundante del vehículo en diferentes zonas:



**Figura 1.2:** Distintas zonas que deben refrigerarse en un coche

Dependiendo del tipo de ensayo que se vaya a realizar se deben refrigerar unas u otras zonas. Se pueden dividir los tipos de ensayos en dos grandes grupos:

- **Emissiones:** Se intenta replicar el flujo de la zona 1, es decir, el flujo bajo el capó, que principalmente se encarga de refrigerar el motor, el radiador, el resto de sistemas de refrigeración y el escape del motor.
- **Investigación y desarrollo (I+D):** Se intentan reproducir las zonas de interés (normalmente todas las de la Figura 1.2 o la mayoría de ellas) lo más fielmente posible. Este tipo de ensayos requiere por lo tanto áreas de soplante mayores que el caso anterior.



**Figura 1.3:** Zonas que deben refrigerarse en diferentes test

Es por tanto evidente que el tamaño de la soplante que se debe emplear depende del tipo de ensayos que se vayan a realizar en la sala de ensayo.

El test de emisiones más importante es el WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures), el cual define un standard global para determinar las emisiones de CO<sub>2</sub> o consumo de combustible. Este test impone por normativa las siguientes características de la soplante:

- Área: 0.3 m<sup>2</sup> (normalmente 0.3 m × 1 m)
- Distancia al coche: 0.3 m
- Distancia al suelo: 0.2 m

Los ensayos de I+D no tienen una normativa sobre la soplante que se debe utilizar ya que dependen de las especificaciones particulares del que vaya a realizar el test. Por norma general se intentan simular todas las zonas de aire de la figura, y como ya se ha dicho, esto requiere mayores áreas de soplante.



**Figura 1.4:** (a) Área de soplante requerida para un ensayo WLTP. (b) Ejemplo de área de soplante utilizada para test de I+D

Sin embargo, mayores áreas de soplante significa mayores caudales, mayor potencia consumida por el motor de la soplante, mayor potencia necesaria de refrigeración en la sala y mayor precio de la soplante.

Por todo esto, es habitual llegar a un compromiso entre la calidad de la simulación del aire alrededor del vehículo y el área de la soplante.

Puesto que el flujo de aire alrededor del coche dependerá principalmente del tamaño de la soplante y su colocación (distancia al coche), estudiar la influencia del área de la soplante flujo utilizando herramientas de mecánica de fluidos computacional resulta interesante debido a que dan una aproximación razonable y se consiguen resultados en periodos de tiempo asumibles según la capacidad computacional que se posea para realizar el estudio.

## 1.2 Antecedentes

Al hacer una búsqueda de las investigaciones previas a este Trabajo Fin de Máster, puede observarse que hay una cantidad considerable de trabajos respecto al estudio aerodinámico de vehículos en túneles de viento o carreteras, por ejemplo (Singh & Pal Singh, 2016).

El estudio de (Sanaye & Dehghandokht, 2011) prueba que la temperatura en el habitáculo del coche está fuertemente influenciada por el flujo de aire alrededor del coche, principalmente debido al intercambio de calor a través de los cristales.

También ha sido demostrado que el flujo bajo el capó es crucial para el correcto enfriamiento del motor (Britcher & Stephenson, 2005) y para la entrada de aire de combustión (Khaled, et al., 2011).

Sin embargo, no se han realizado muchas investigaciones respecto al estudio del flujo producido por soplantes en banco de rodillos. A continuación, se reseñan los más importantes.

La investigación llevada a cabo por (Fernández-Yanez, et al., 2016) estudia la influencia de la distancia al coche de la soplante en un banco de rodillos climático (preparado para trabajar a bajas temperaturas). Sin embargo, no se cuantifica esta influencia, aunque sí que se concluye que el flujo bajo el coche contribuye a refrigerar el sistema de escape.

(Broatch, et al., 2017) realizan un estudio donde se estudian dos soplantes a dos distancias diferentes y se llega a la conclusión de que tanto la distancia al vehículo como el área de la soplante tienen una gran influencia en el flujo alrededor del coche. También se concluye que la distancia al vehículo es un parámetro que afecta más que el área de la soplante a la hora de reproducir fielmente el flujo del coche en carretera y que distancias demasiado corta generan demasiada sobrepresión en la parte frontal del vehículo.

## 1.3 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es poder llegar a un criterio para decidir que soplante debe utilizarse en función de los requisitos del cliente de manera justificada.

Para ello, se han marcado una serie de objetivos parciales:

- Estudiar el flujo de varias soplantes utilizadas habitualmente en la industria y compararlo con el flujo circundante al coche cuando éste está en la carretera.
- Simular con AVL FIRE cada una de las soplantes mediante el procedimiento que se detalla en el capítulo siguiente. Una vez terminado este paso, se estudiar los

resultados más representativos para ver que zonas de la Figura 1.1 son las que más fielmente se refrigeran mediante cada una de las soplantes.

- Estudiar cuatro soplantes, más el caso del coche situado en la carretera. Para cada una de las soplantes estudiar diferentes configuraciones (diferentes colocaciones o velocidades). En el capítulo siguiente se detallan cada una de estas soplantes.

### **1.3.1 Objetivos específicos**

- Crear una metodología coherente que permita predecir el comportamiento del flujo alrededor del coche, aplicando criterios de convergencia y modelos de turbulencia adecuados.
- Conocer para cada soplante, las zonas de la Figura 1.1 que mejor se refrigeran.
- Estudiar la influencia de la diferente colocación de la soplante en el flujo.
- Estudiar la influencia de la diferente velocidad de salida de aire de la soplante en el flujo.

## **1.4 Estructura de la Memoria**

La presente memoria que describe el Trabajo Fin de Máster, está conformada por cuatro capítulos:

El primer capítulo es la introducción del trabajo, en la cual se indica la importancia y justificación del estudio, así como los objetivos a desarrollar durante la investigación.

En el capítulo 2 se explica la metodología computacional para desarrollar los objetivos, se definen las soplantes reales que serán analizadas y su modelización en AVL FIRE

En el capítulo 3 se presentan los resultados del modelo numérico. Se comparan los resultados de las diferentes soplantes con el caso del coche en la carretera y se estudia la influencia de las diferentes colocaciones y velocidades de salida de la soplante.

A continuación, en el capítulo 4 se presentan las conclusiones del trabajo y se plantean recomendaciones y posibles trabajos futuros en función de los puntos fuertes y débiles del modelo.

Finalmente, se citan las referencias consultadas durante la realización de este trabajo.





## Capítulo 2

---

# METODOLOGÍA COMPUTACIONAL

En el presente capítulo se describe el desarrollo y la metodología computacional para determinar el flujo alrededor de un coche cuando está en la carretera y en una sala de ensayo. Primero se identifica el dominio computacional, se modela la geometría con ayuda de un programa de CAD y se construye la malla mediante ANSYS ICEM, luego se especifica el modelo computacional haciendo uso del software AVL FIRE, se imponen las condiciones de contorno, de operación y por último se expone la metodología empleada para la selección del modelo de turbulencia y el algoritmo de resolución.

## 2.1 Soplantes a estudiar

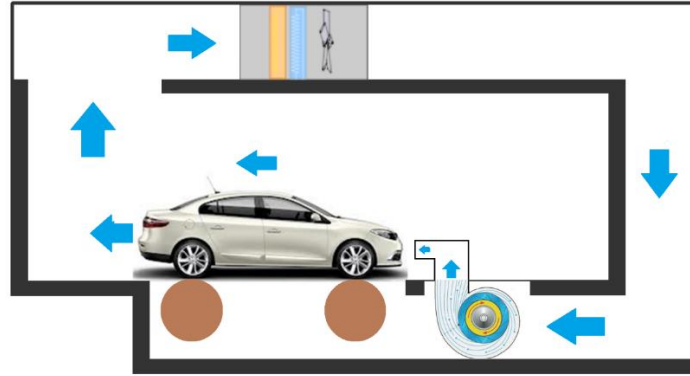
Se van a estudiar cuatro soplantes diferentes, cada una de ella con un propósito diferente, las cuales se describen a continuación.

### 2.1.1 Soplante 1

La primera soplante que se va a estudiar está pensada para cumplir la normativa WLTP, la cual define unos estándares para determinar los niveles de CO<sub>2</sub>, contaminantes emitidos y consumo de combustible en vehículos de pasajeros. El test WLTP llega hasta una velocidad de aproximadamente 130 km/h.

Esta soplante es también capaz de llevar a cabo test RDE (*Real Drive Emissions*), los cuales llegan hasta 160 km/h.

Esta soplante tiene un área de salida de 1 m de largo y 0.3 m de alto, y se colocará a una distancia del coche de 30 cm y a una distancia del suelo de 20 cm, tal y como especifica la normativa WLTP. Para el modo RDE se colocará en la misma posición. La soplante cogerá el aire del foso de la sala de ensayos (la parte que hay bajo el suelo de la sala).



**Figura 2.1:** Coche dentro de la sala de ensayos con la soplante 1

Se simularán dos velocidades, 130 km/h y 160 km/h, correspondientes a la velocidad máxima del test WLTP y RDE respectivamente. Ambos test tienen como objetivo medir emisiones, por lo que la zona crítica a refrigerar de manera correcta es la zona 1 de la Figura 1.3 (el radiador y elementos bajo el capó).

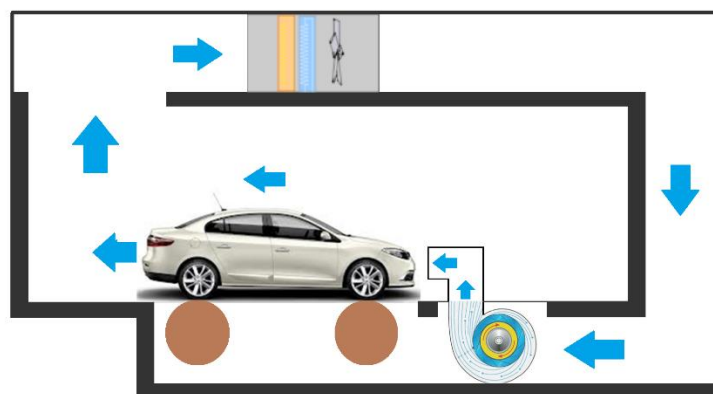
### 2.1.2 Soplante 2

La soplante 2 está orientada a hacer ensayos de I+D, de manera que se busca que simule lo mejor posible todo el flujo alrededor del coche. Esta soplante es capaz de reducir su área de salida para alcanzar mayores velocidades. La soplante 2 representa el modo de funcionamiento con el área de salida normal, mientras que la soplante 3 representa la soplante con el área reducida.

La soplante 2 tiene las siguientes características:

- Largo: 0.8 m
- Alto: 0.625 m

La boca de salida está colocada a una distancia de 20 cm del suelo.



**Figura 2.2:** Coche dentro de la sala de ensayos con la soplante 2

Al ser un estudio de I+D la colocación de la soplante respecto al coche es completamente libre, por lo que se han simulado dos distancias diferentes al coche. Estas distancias son a 30 cm y 60 cm del coche.

La máxima velocidad a la que llega esta soplante con el área sin reducir son 130 km/h, por lo que sólo se ha estudiado esta velocidad.

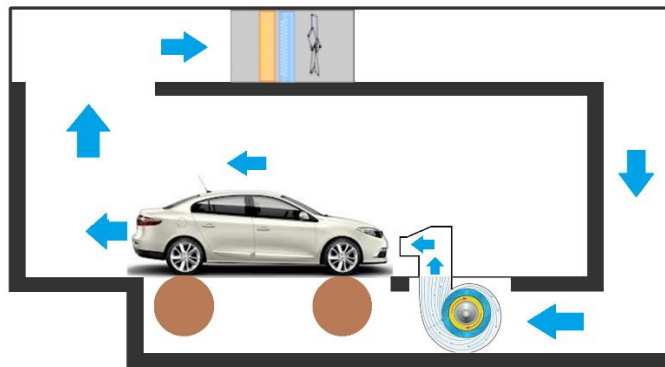
### 2.1.3 Soplante 3

La soplante 3 corresponde al modo de funcionamiento de la soplante 2 cuando se reduce su área de salida para aumentar la velocidad que puede alcanzar. Con este modo de funcionamiento se llega hasta 160 km/h, por lo que esta velocidad ha sido la elegida para el estudio. No se ha estudiado a 130 km/h porque esta velocidad corresponde al modo de funcionamiento con área sin reducir, es decir, la soplante 2.

La soplante 3 tiene las siguientes características:

- Largo: 0.8 m
- Alto: 0.375 m

La colocación respecto al coche es la misma que la de la soplante 2, tanto respecto al suelo como al coche, de manera que se han estudiado también dos distancias al coche.



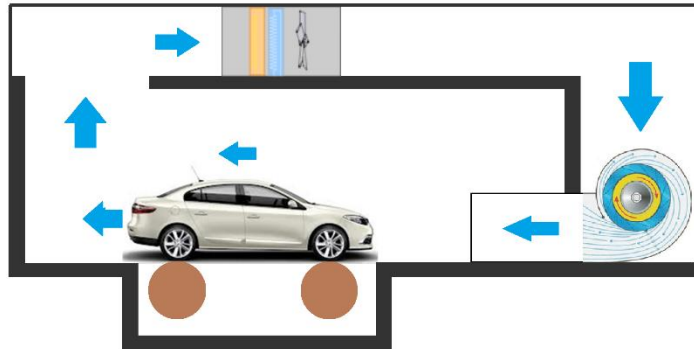
**Figura 2.3:** Coche dentro de la sala de ensayos con la soplante 3

La colocación respecto al coche es la misma que la de la soplante 2, tanto respecto al suelo como al coche, de manera que se han estudiado también dos distancias al coche.

### 2.1.4 Soplante 4

La soplante 4 está orientada a hacer ensayos de I+D con la mayor precisión posible al tener un área mucho mayor que las anteriores. Esta soplante tiene las siguientes características:

- Largo: 1.3 m
- Alto: 1.3 m



**Figura 2.4:** Coche dentro de la sala de ensayos con la soplante 4

Esta soplante además es capaz de llegar a 200 km/h. Se simularán tres velocidades, 130, 160 y 200 km/h, a 90 cm de distancia del coche (distancia especificada para algunos test de comportamiento aeroclimático como el SC03).

La distancia al suelo será cero, de manera que se simule el flujo bajo el coche lo mejor posible.

### 2.1.5 Resumen de simulaciones realizadas

La Tabla 2.1 muestra la tabla resumen de las simulaciones llevadas a cabo para cada una de las soplantes.

**Tabla 2.1:** Tabla de simulaciones de soplantes

	Soplante 1	Soplante 2	Soplante 3	Soplante 4
Largo (m)	1	0.8	0.8	1.3
Alto (m)	0.3	0.625	0.375	1.3
Distancia coche (m)	0.3	0.3/0.6	0.3/0.6	0.9
Distancia suelo (m)	0.2	0.2	0.2	0
Velocidad (km/h)	130/160	130	160	130/160/200

Además de las simulaciones de las soplantes, se ha llevado a cabo la simulación del coche en carretera para tener la referencia de cómo sería el flujo real del coche. En este caso se han simulado todas las velocidades estudiadas en las soplantes, es decir 130, 160 y 200 km/h.

## 2.2 Identificación del dominio computacional

El primer paso en cualquier simulación CFD es decidir el alcance que va a tener la simulación, es decir cuánto y con qué precisión se va a simular.

En este caso se trata básicamente de un estudio aerodinámico, sin embargo, la variable de interés no es el coeficiente aerodinámico, el cual requiere una modelización relativamente detallada de la geometría externa del coche para ser calculado, por lo que la geometría del coche ha sido simplificada.

En el caso del coche en carretera el dominio comprende la geometría del vehículo y un gran paralelepípedo que hará las veces de carretera y aire. Este paralelepípedo debe ser lo suficientemente grande (unos 40 coches de largo, 6 de alto y 6 de ancho) como para permitir que el flujo no esté perturbado a la salida.

En el caso con el coche en la sala de ensayos, el dominio comprende la geometría del coche dentro de un paralelepípedo con la forma de la sala. Además, se ha modelado la boca de salida de la soplante, para la cual se ha supuesto un perfil de velocidades uniformes a la salida. No se ha simulado la zona de recirculación del aire ni la voluta y la tobera de salida de la soplante por no considerarse que aportaran información relevante al estudio.

Al ser un dominio simétrico, se ha modelado solo la mitad del éste y así se reduce el tamaño del problema a la mitad.

## 2.3 Herramientas utilizadas

La construcción de la geometría y la malla se ha llevado a cabo mediante CATIA V5 y ANSYS ICEM CFD respectivamente.

Las simulaciones se han llevado a cabo en AVL FIRE. Es un código CFD de propósito general basado en el método de los volúmenes finitos como elemento central. Además de esto, es capaz de trabajar con interfaces móviles, contornos deformables, múltiples sistemas de referencia, fijos o móviles, flujos turbulentos y laminares, compresibles e incompresibles... También permite simular efectos de transmisión de calor materiales porosos y tiene tratamiento de pared mejorado.

FIRE ofrece varias opciones para modelar la turbulencia, desde el ampliamente utilizado modelo  $k-\varepsilon$  hasta los más complejos modelos de tensiones de Reynolds. Uno de los desarrollos más recientes en este campo ha sido el modelo  $k-\zeta-f$ , que es válido para flujos altamente comprimidos en dominios con contornos móviles. También proporciona soluciones precisas y eficientes para flujos rotantes y con separación.

FIRE utiliza un algoritmo segregado *pressure-based* y dispone de esquemas de discretización de primer y segundo orden.

## 2.4 Modelado de la geometría

El modelo del coche se ha construido en CATIA V5 mediante operaciones básicas de extrusión y redondeo desde cero, permitiendo así que la geometría sea representada de la manera más limpia y sencilla posible. Antes de exportar la geometría al programa de mallado ésta se ha dividido por la mitad cortando al modelo por el plano de simetría. Las dimensiones de referencia han sido las de un BMW serie 3.

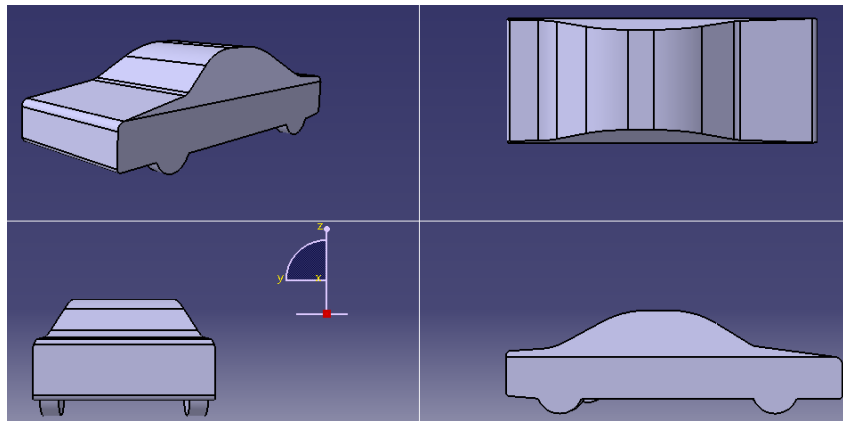


Figura 2.5: Modelo CAD del coche

## 2.5 Mallado de la geometría

La generación del mallado consiste en la discretización del dominio geométrico en pequeñas celdas y representa el primer paso del modelado numérico. Para realizar este proceso se utiliza el código comercial ANSYS ICEM CFD, el cual consiste en una interfaz destinada a la creación de geometrías y mallas

Se ha utilizado una estrategia de mallado multiblock para mallar la geometría, la cual genera una malla hexaédrica pura. La elección de este tipo de malla se ha escogido por las siguientes razones:

- Menor número de celdas necesarias que con celdas tetraédricas para conseguir la misma resolución (de 6 a 8 veces menos).
- Gran control del modelado de la capa límite.
- Menor consumo de recursos computacionales que una malla tetraédrica.
- Mayor calidad de la malla.

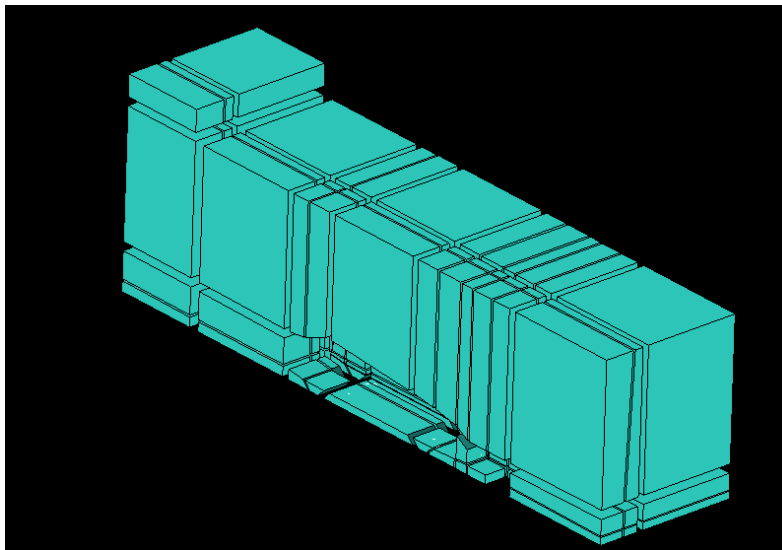
- Mayor facilidad para converger.

Como inconvenientes se pueden citar:

- Procedimiento totalmente manual, muy laborioso.
- Gran dificultad para mallar geometrías complejas.
- Imposibilidad de refinar la malla localmente (malla hexaédrica pura sin nodos colgantes).

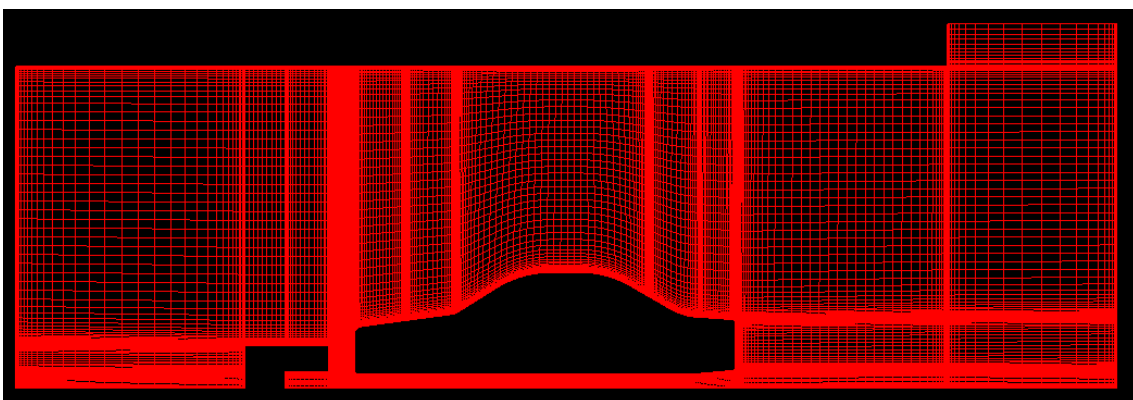
Aunque hacer una malla hexaédrica de este tipo requiere más tiempo y es más complejo que una tetraédrica, su mayor facilidad de convergencia y el menor número de celdas necesarias hace que el ahorro en tiempo de simulación que se compense con creces.

La Figura 2.6 muestra una imagen con la topología de bloques de una de las mallas.



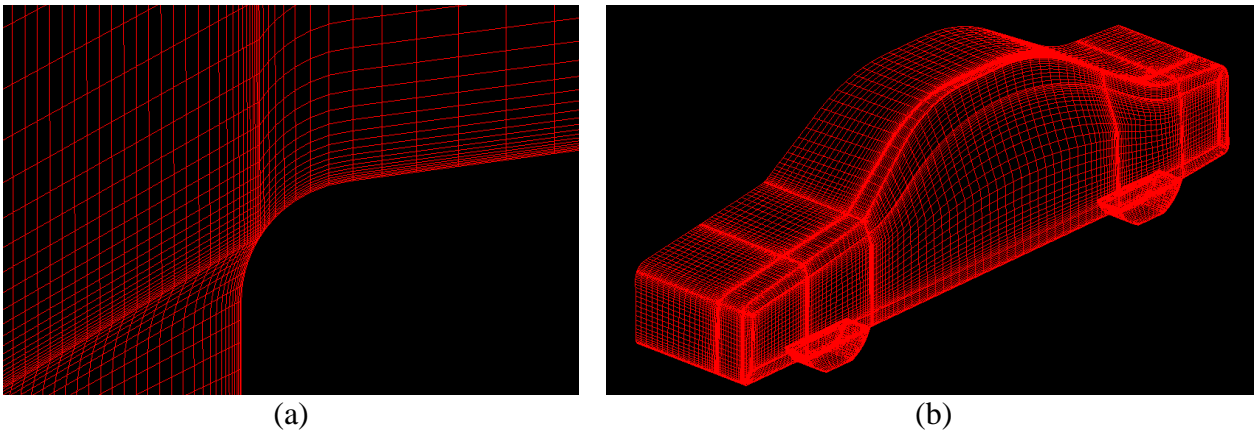
**Figura 2.6:** Topología de bloques de una de las mallas

Una vez definida la topología, se ajustan los parámetros de cada bloque hasta conseguir la malla deseada. La Figura 2.7 muestra la malla construida a partir de los bloques anteriores.



**Figura 2.7:** Mallado de la sala con la soplante 1

La capa límite del coche se ha modelado con un ratio de crecimiento de 1.2 y una altura de la primera celda de 1 mm. De esta manera se evitan  $y^+$  mayores de 200 en la superficie del coche, tal y como recomienda el manual de FIRE para el modelo de turbulencia usado. El parámetro  $y^+$  cuantifica una distancia adimensional a la pared desde el centro de la celda. Para una descripción más detallada de  $y^+$  se recomienda la lectura de (Crespo, 2006). La capa límite de las paredes se ha modelado con el mismo ratio de crecimiento, pero con una mayor altura en la primera celda de la pared al ser las velocidades menores que en la zona cercana al coche.



**Figura 2.8:** (a) Detalle del mallado de la capa límite. (b) Mallado de la superficie del coche.

En cuanto al número de celdas, aproximadamente se han utilizado  $3.5 \times 10^6$  celdas en la simulación con coche en carretera y  $1.5 \times 10^6$  celdas en la simulación con el coche en sala.

Se han tomado como cota inferior los siguientes criterios de calidad en todas las mallas que se han utilizado:

- Calidad ortogonal  $> 0.2$
- Oblicuidad  $< 0.98$
- Ángulo mínimo  $> 18^\circ$

## 2.6 Simulación en FIRE

Esta etapa comprende la exportación de la malla a FIRE, la configuración del *solver*, el estudio de independencia de la malla y la realización del resto de simulaciones.



## 2.6.1 Propiedades del fluido

Las propiedades del fluido consideradas para el estudio permanecen constantes y están representadas en la siguiente tabla

**Tabla 2.2:** Propiedades del aire

Fluido	Aire
Temperatura	20 °C
Densidad	1.18 kg/m <sup>3</sup>
Presión	1 bar

## 2.6.2 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que se han impuesto han sido las siguientes:

### **Coche en carretera:**

Entrada de aire al dominio: Se ha seleccionado la opción *Velocity inlet* con la velocidad que corresponda a cada una de las simulaciones. Se ha impuesto una energía cinética turbulenta de 0.28 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> y una escala de longitud turbulenta de 0.001 m como recomienda el manual de FIRE para este tipo de problemas.

Salida de aire al dominio: Se ha seleccionado la opción *Gradient = 0*. Este tipo de condición de contorno se utiliza en salidas donde el flujo está completamente desarrollado.

Carretera: Se ha seleccionado la opción *Wall* y después se ha impuesto un movimiento a la pared paralelo al flujo de aire y con la misma magnitud y sentido que la velocidad del vehículo.

Coche: Se ha seleccionado la opción *Wall*, a la que no se le ha impuesto ningún movimiento, ya que el sistema de referencia es el coche.

Resto de paredes: Se ha seleccionado la opción *Symmetry* tal y como recomienda la guía de FIRE para problemas de aerodinámica externa.

**Tabla 2.3:** Condiciones de contorno en carretera

<b>Entrada de aire al dominio</b>	<i>Velocity inlet</i>
<b>Salida de aire del dominio</b>	<i>Gradient = 0</i>
<b>Carretera</b>	<i>Moving wall</i>
<b>Plano de simetría</b>	<i>Symmetry</i>
<b>Pared superior del dominio</b>	<i>Symmetry</i>
<b>Pared lateral del dominio</b>	<i>Symmetry</i>
<b>Coche</b>	<i>Wall</i>

**Coche en sala:**

Entrada de aire al dominio (tobera de la soplante): Se ha seleccionado la opción *Mass Flow* con un flujo másico que corresponda a la velocidad que se desee en la boca de salida de la soplante. Se ha seleccionado la opción de turbulencia y diámetro hidráulico para todos los casos con un valor de turbulencia de un 15%.

Salida de aire del dominio (salida de la sala de ensayos): Se ha seleccionado la opción *Mass Flow* con el mismo valor que a la entrada del dominio, pero con signo contrario. Se ha seleccionado la opción de turbulencia y diámetro hidráulico para todos los casos con un valor de turbulencia de un 5%.

Plano de simetría: Se ha seleccionado la opción *Symmetry*.

Coche y resto de paredes: Se ha seleccionado la opción *Wall*, a la que no se le ha impuesto ningún movimiento.

**Tabla 2.4:** Condiciones de contorno en sala

<b>Salida de aire de la soplante</b>	<i>Mass Flow inlet</i>
<b>Salida de aire de la sala</b>	<i>Mass Flow outlet</i>
<b>Plano de simetría</b>	<i>Symmetry</i>
<b>Resto de paredes y objetos</b>	<i>Wall</i>

**2.6.3 Selección del modelo de turbulencia**

De los tres grandes grupos de aproximaciones a la turbulencia (DNS, LES, RANS) el único que no resulta prohibitivo dada la capacidad de cómputo disponible es RANS.

Dentro de los modelos RANS, los más utilizados en este tipo de problemas son  $k - \epsilon$  y  $k - \omega$ .

El modelo  $k - \omega$  simula toda la capa límite, necesitando un  $y^+ \approx 1$ , lo que requeriría una altura de las primeras celdas en la pared del orden de décimas de milímetro, aumentando de manera muy significativa el número de celdas de la malla y por tanto el tiempo de simulación.

El modelo de turbulencia elegido para las simulaciones será *Standard  $k - \epsilon$* , utilizado ampliamente por su conocida robustez y razonable precisión. Además, FIRE no dispone de la posibilidad de utilizar otro modelo de la familia  $k - \epsilon$  como el *RNG* o *Realizable*, a pesar de tener estos últimos mejor comportamiento en problemas con capas límites con gradientes de presión adversos.

Los modelos  $k - \epsilon$  utilizan funciones de pared (*Wall functions*) para modelar la capa límite. En este caso se ha seleccionado la opción *Hybrid wall treatment*.

Según el manual de usuario de FIRE, este tratamiento de pared asegura un cambio gradual entre la formulación de la subcapa viscosa y las funciones de pared.

Este tratamiento utiliza funciones de pared para valores elevados de  $y^+$  mientras que para valores muy pequeños integra las ecuaciones hasta la pared.

#### 2.6.4 Controles de solución

Para este estudio la ecuación de la energía no ha sido resuelta dado que se ha despreciado todo efecto de transmisión de calor en la sala. Además, el posible incremento de temperatura que pudiera provocar la soplante al aire no es objeto de estudio. Por lo tanto, se asumirá una temperatura constante durante toda la simulación y la gravedad se desprecia dada la baja densidad del aire.

Al estar trabajando con números de Mach menores de 0.3 se puede asumir que el flujo se comporta como incompresible; esto permite que se pueda utilizar una aproximación *pressure-based* para resolver las ecuaciones de flujo.

Se ha utilizado el algoritmo de resolución SIMPLE (*pressure-based segregated*). Este algoritmo ha sido muy utilizado en la literatura, y sigue siendo hoy día una de las elecciones más habituales en la resolución de simulaciones de carácter industrial.

En cuanto al esquema de discretización empleado, se ha utilizado el *upwind* de primer orden para todas las simulaciones por su mayor facilidad para converger respecto a otros esquemas más precisos y complejos. Además, al utilizar mallas hexaédricas puras, la difusión numérica no es tan importante como en las tetraédricas si el flujo está alineado con la malla (en las tetraédricas nunca lo está).

El factor de sub relajación de la ecuación del *momentum* ha sido reducido al principio de la simulación para evitar la divergencia de ésta. Una vez estabilizada la solución se ha aumentado al valor por defecto.

En cuanto al criterio de convergencia, se ha fijado en  $10^{-4}$  para todos los residuales.

#### 2.6.5 Estudio de independencia de malla

El objetivo de esta etapa es asegurarse de que los resultados obtenidos son independientes de la resolución del mallado. Muy pocas celdas pueden llevar a una solución errónea, mientras que demasiadas pueden suponer el gasto innecesario de recursos.

Utilizando como referencia (Broatch, et al., 2017) se ha estimado el orden de magnitud del número de celdas a utilizar:

- Coche en carretera  $\approx 3 \times 10^6$  celdas

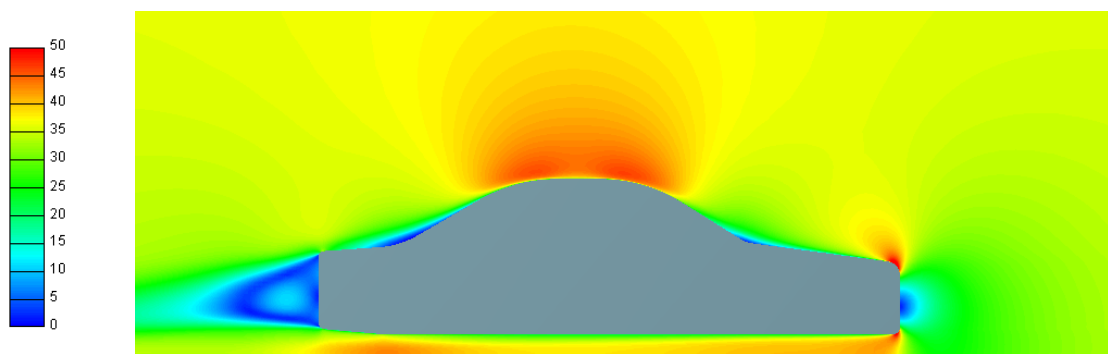
- Coche en sala de ensayos  $\approx 1.5 \times 10^6$  celdas

Una vez realizada una simulación con estas mallas y alcanzada la convergencia, se refinan hasta obtener el doble de celdas en cada caso, es decir:

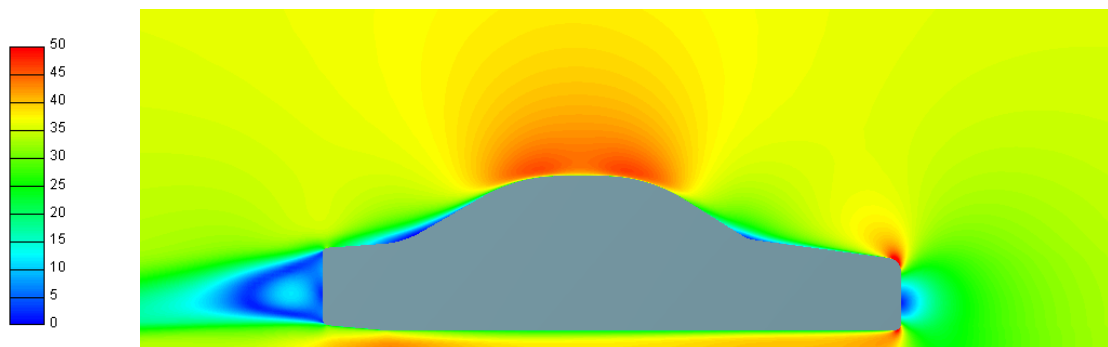
- Coche en carretera  $\approx 6 \times 10^6$  celdas
- Coche en sala de ensayos  $\approx 3 \times 10^6$  celdas

Se ha observado que los resultados de las mallas originales no varían de forma apreciable respecto a las mallas refinadas, por lo que entonces la malla inicial es lo suficientemente precisa para capturar el resultado. En la Figura 2.9 y Figura 2.10 se muestran los resultados de los contornos de velocidad para ambas mallas en el caso del coche en carretera. No se aprecian cambios entre la simulación en carretera con malla fina y gruesa. En la Figura 2.11 y Figura 2.12 se presentan los mismos contornos, pero en el caso realizado con una de las soplantes. Tampoco se aprecian cambios.

Coche en carretera, contornos de velocidad a 130 km/h:

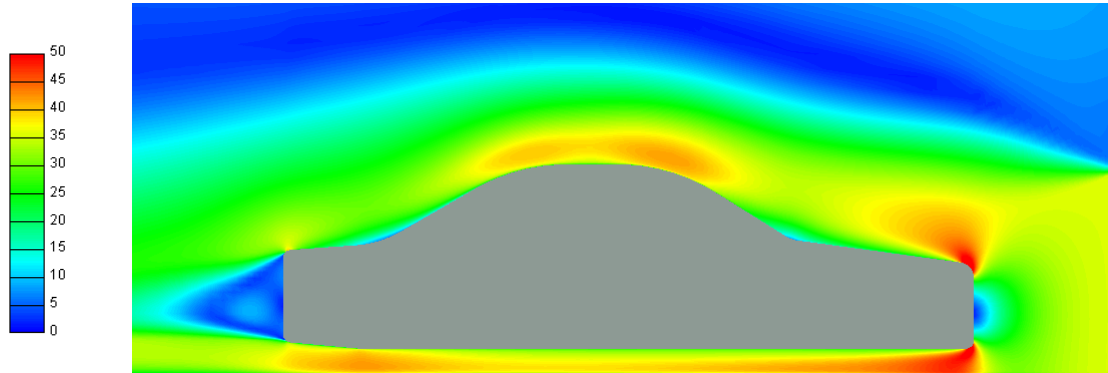


**Figura 2.9:** Contornos de velocidad [m/s] en carretera, malla fina.

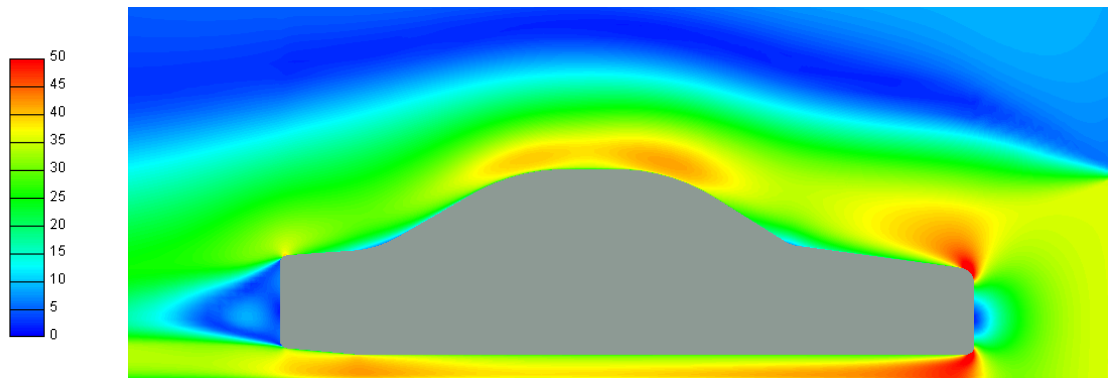


**Figura 2.10:** Contornos de velocidad [m/s] en carretera, malla gruesa.

Coche en sala, soplante 4, contornos de velocidad a 130 km/h:



**Figura 2.11:** Contornos de velocidad [m/s] con la soplante 4, malla fina.



**Figura 2.12:** Contornos de velocidad [m/s] con la soplante 4, malla gruesa.



## Capítulo 3

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se van a analizar los resultados numéricos obtenidos para determinar la capacidad de cada soplante de simular el aire alrededor del vehículo. Se presentan en primer lugar los resultados de la simulación del coche en carretera. Posteriormente, se analizan los resultados de cada soplante.

Se recuerdan los casos que se han estudiado:

**Tabla 3.1:** Simulaciones llevadas a cabo

	Soplante 1	Soplante 2	Soplante 3	Soplante 4	Carretera
Largo (m)	1	0.8	0.8	1.3	-
Alto (m)	0.3	0.625	0.375	1.3	-
Distancia coche (m)	0.3	0.3/0.6	0.3/0.6	0.9	-
Distancia suelo (m)	0.2	0.2	0.2	0	-
Velocidad (km/h)	130/160	130	160	130/160/200	130/160/200

Se presentarán los resultados de la siguiente forma:

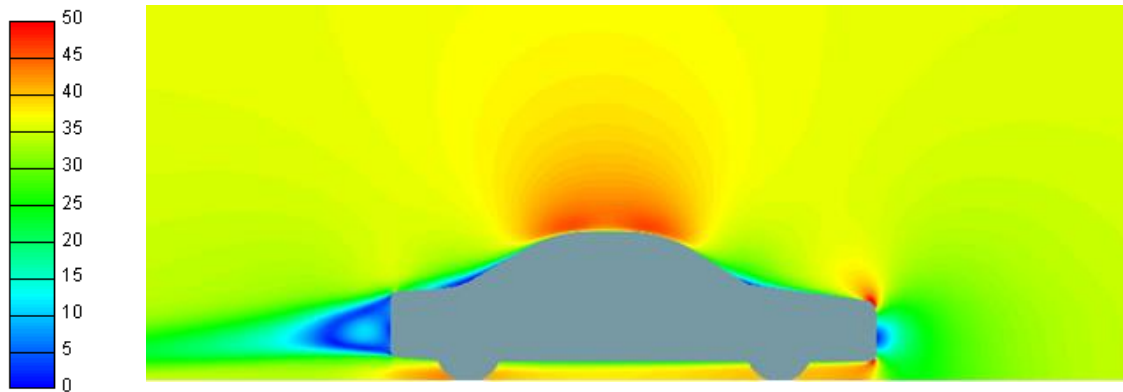
1. Contornos de velocidad y presión en el plano de simetría.
2. Contornos de velocidad bajo el coche.
3. Contornos de velocidad en diferentes planos perpendiculares al plano de simetría.
4. Contornos de presión en la superficie del coche.

Después de presentar los resultados de cada caso, se analizan. Para mantener un orden se ha dividido el flujo en las zonas de la Figura 1.2.

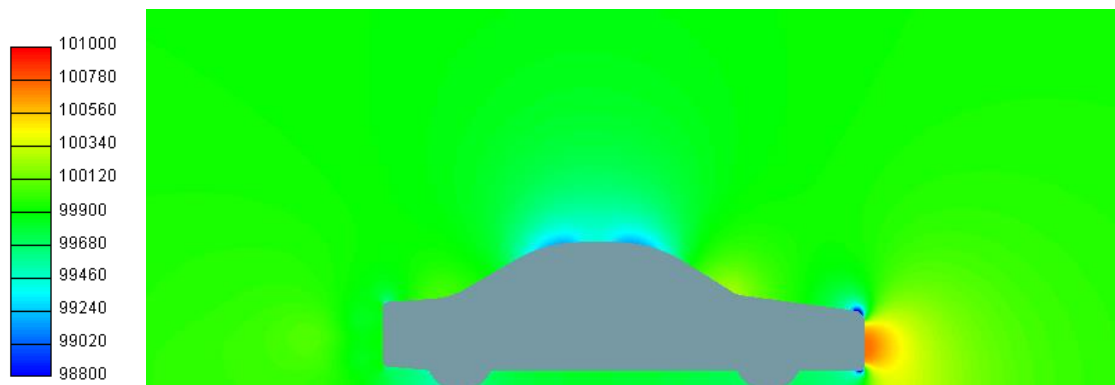
## 3.1 Coche en carretera

### 3.1.1 Velocidad: 130 km/h

#### 3.1.1.1 Contornos de presión y velocidad en el plano de simetría

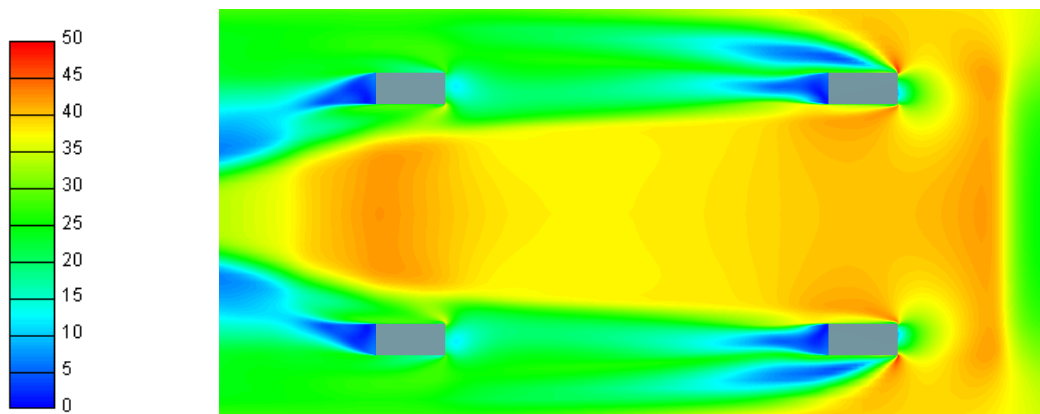


**Figura 3.1:** Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 130 km/h. Plano de simetría.



**Figura 3.2:** Contornos de presión [Pa] en carretera a 130 km/h. Plano de simetría.

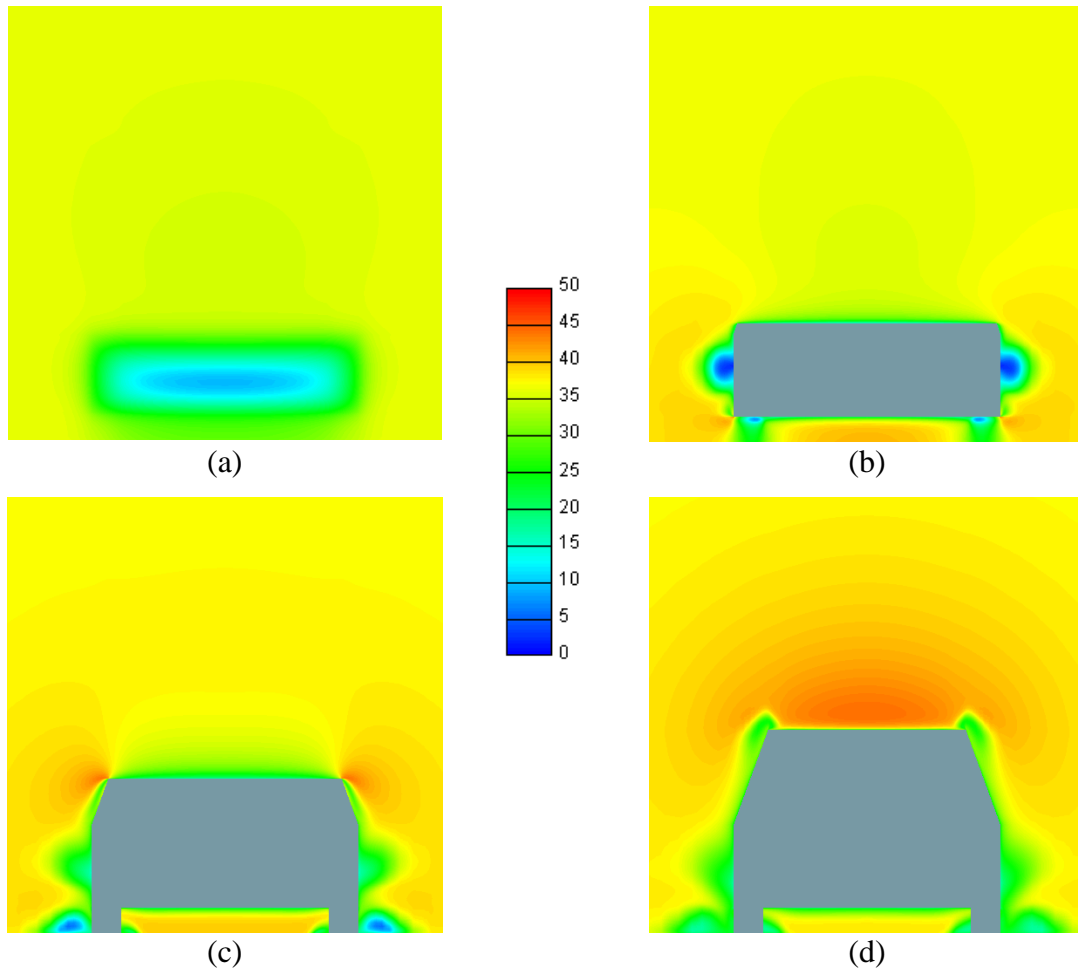
#### 3.1.1.2 Contornos de velocidad bajo el coche



**Figura 3.3:** Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 130 km/h. Bajo el coche.

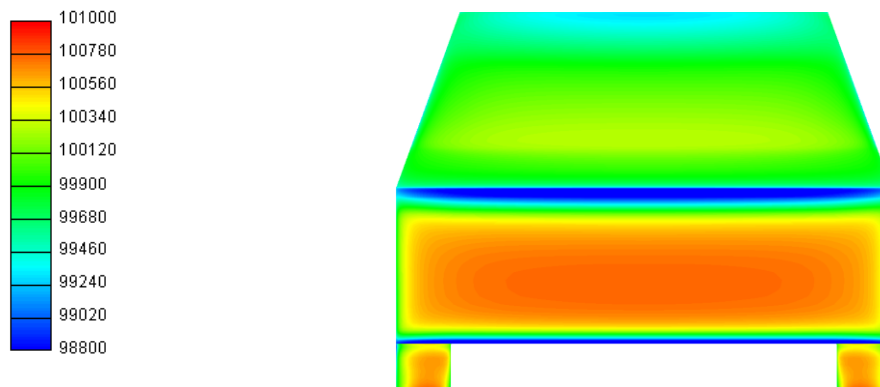


3.1.1.3 *Contornos de velocidad en planos perpendiculares al plano de simetría*



**Figura 3.4:** (a) Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 130 km/h, a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (d) 2.45 m tras el frontal.

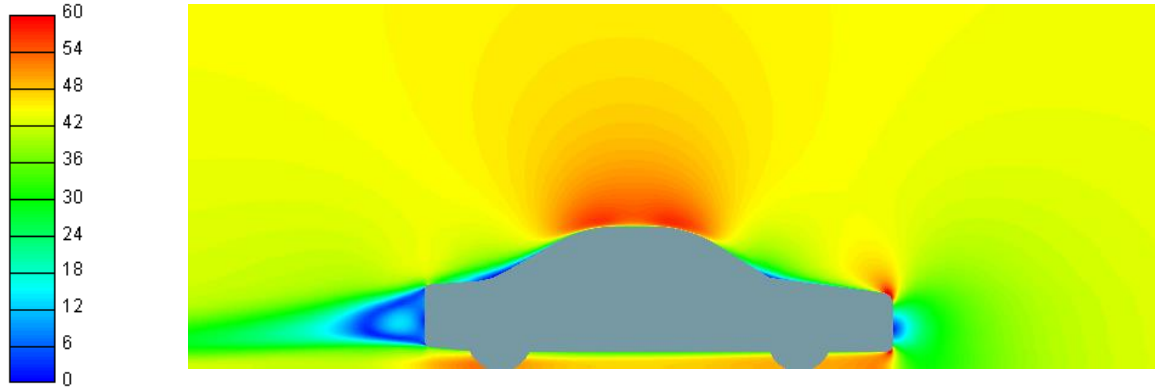
3.1.1.4 *Contornos de presión en la superficie del coche*



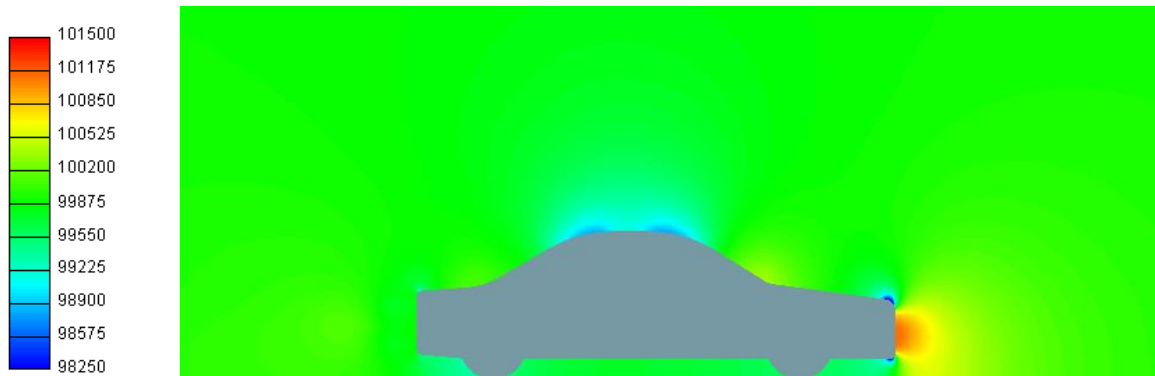
**Figura 3.5:** (a) Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche en carretera, a 130 km/h.

### 3.1.2 Velocidad: 160 km/h

#### 3.1.2.1 Contornos de presión y velocidad en el plano de simetría

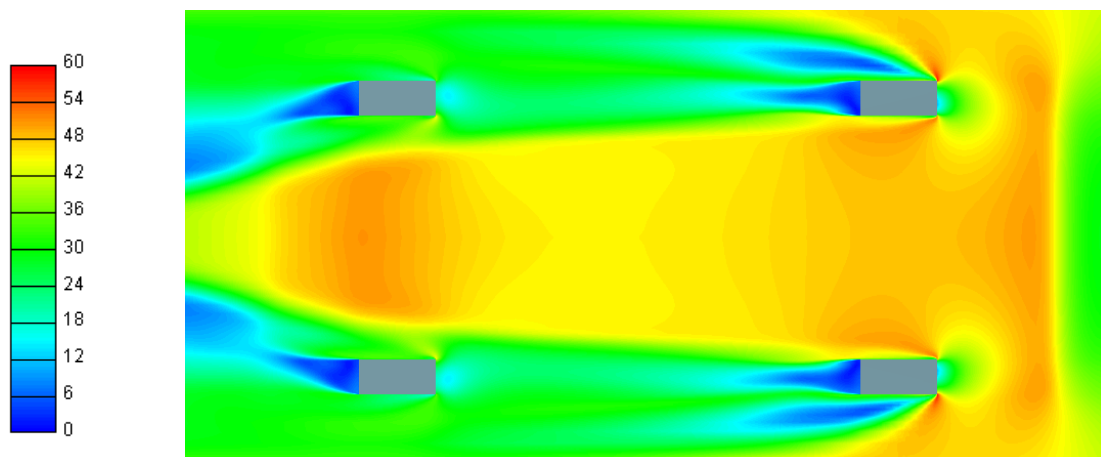


**Figura 3.6:** Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 160 km/h. Plano de simetría.



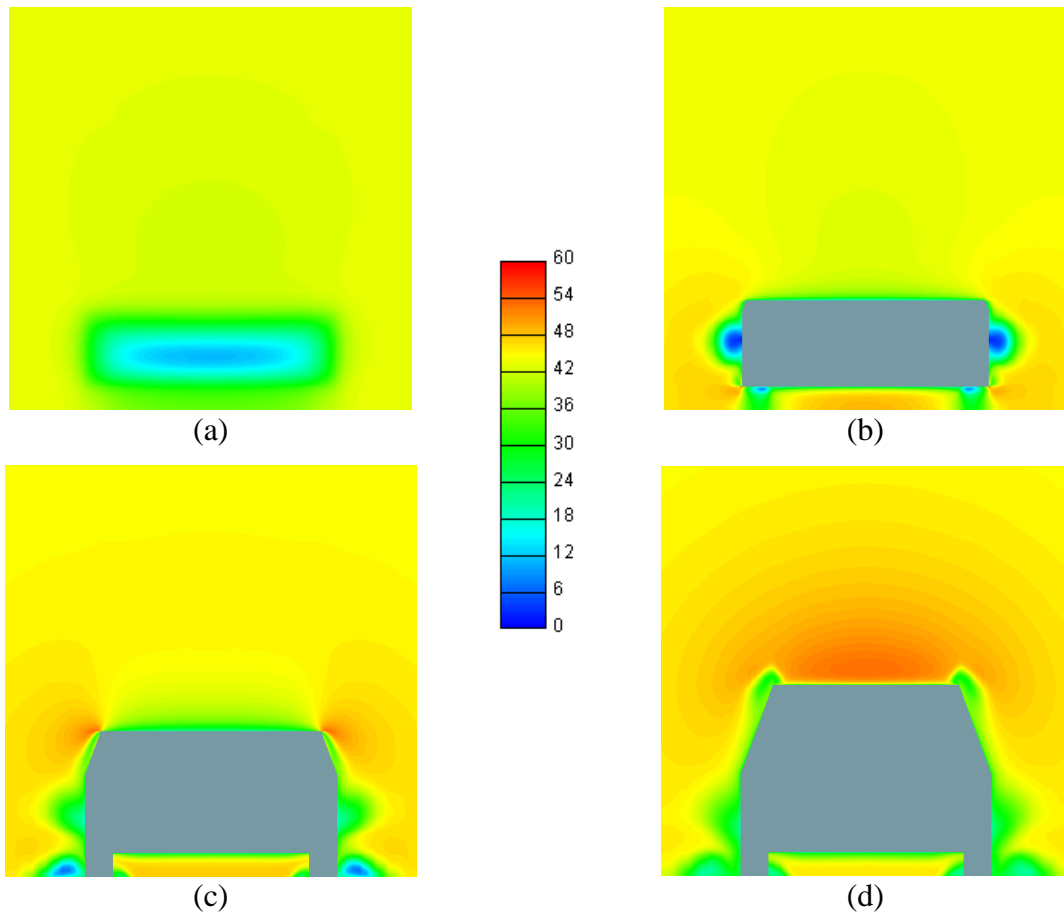
**Figura 3.7:** Contornos de presión [Pa] en carretera a 160 km/h. Plano de simetría.

#### 3.1.2.2 Contornos de velocidad bajo el coche



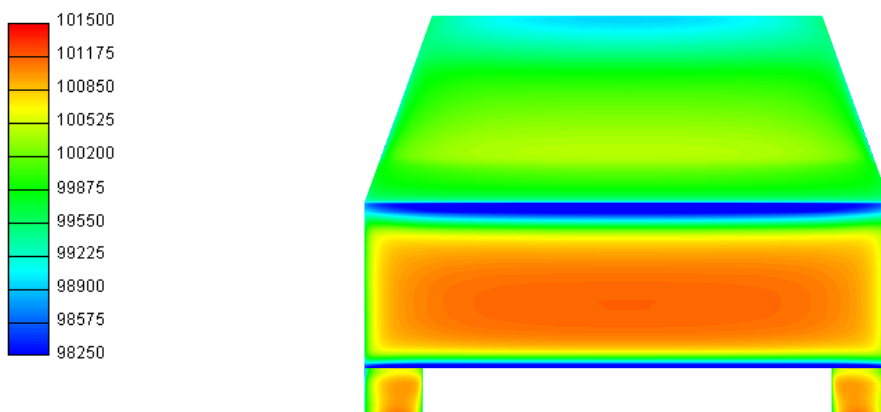
**Figura 3.8:** Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 160 km/h. Bajo el coche.

3.1.2.3 *Contornos de velocidad en planos perpendiculares al plano de simetría*



**Figura 3.9:** (a) Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 160 km/h, a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (d) 2.45 m tras el frontal.

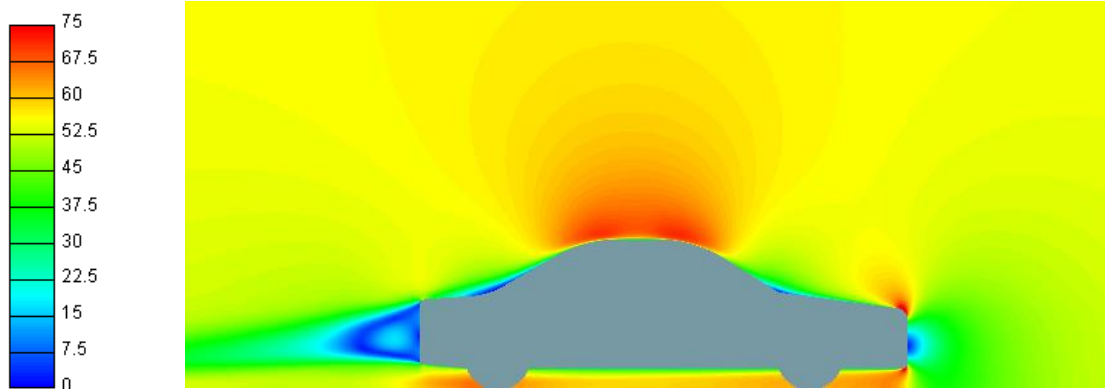
3.1.2.4 *Contornos de presión en la superficie del coche*



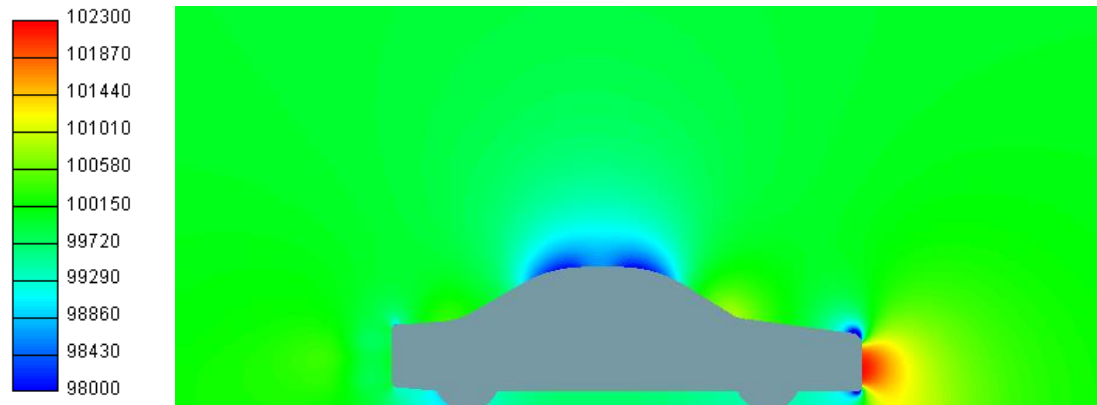
**Figura 3.10:** (a) Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche en carretera, a 160 km/h.

### 3.1.3 Velocidad: 200 km/h

#### 3.1.3.1 Contornos de presión y velocidad en el plano de simetría

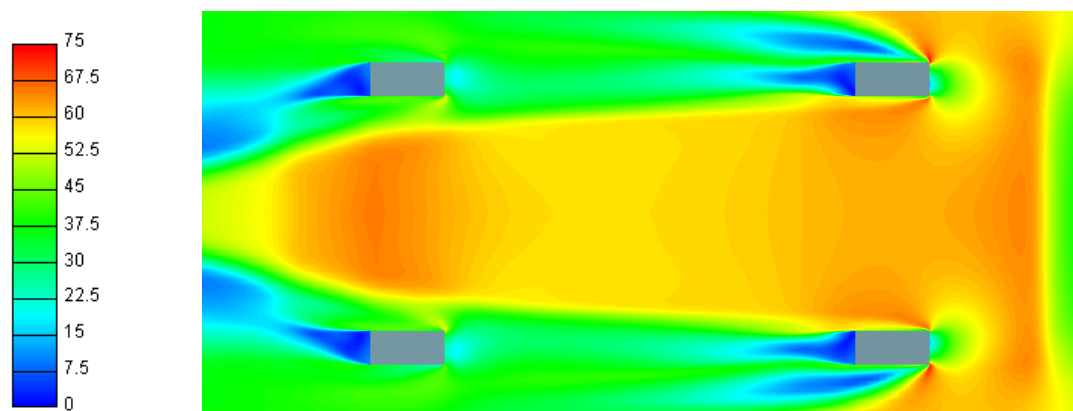


**Figura 3.11:** Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 200 km/h. Plano de simetría.



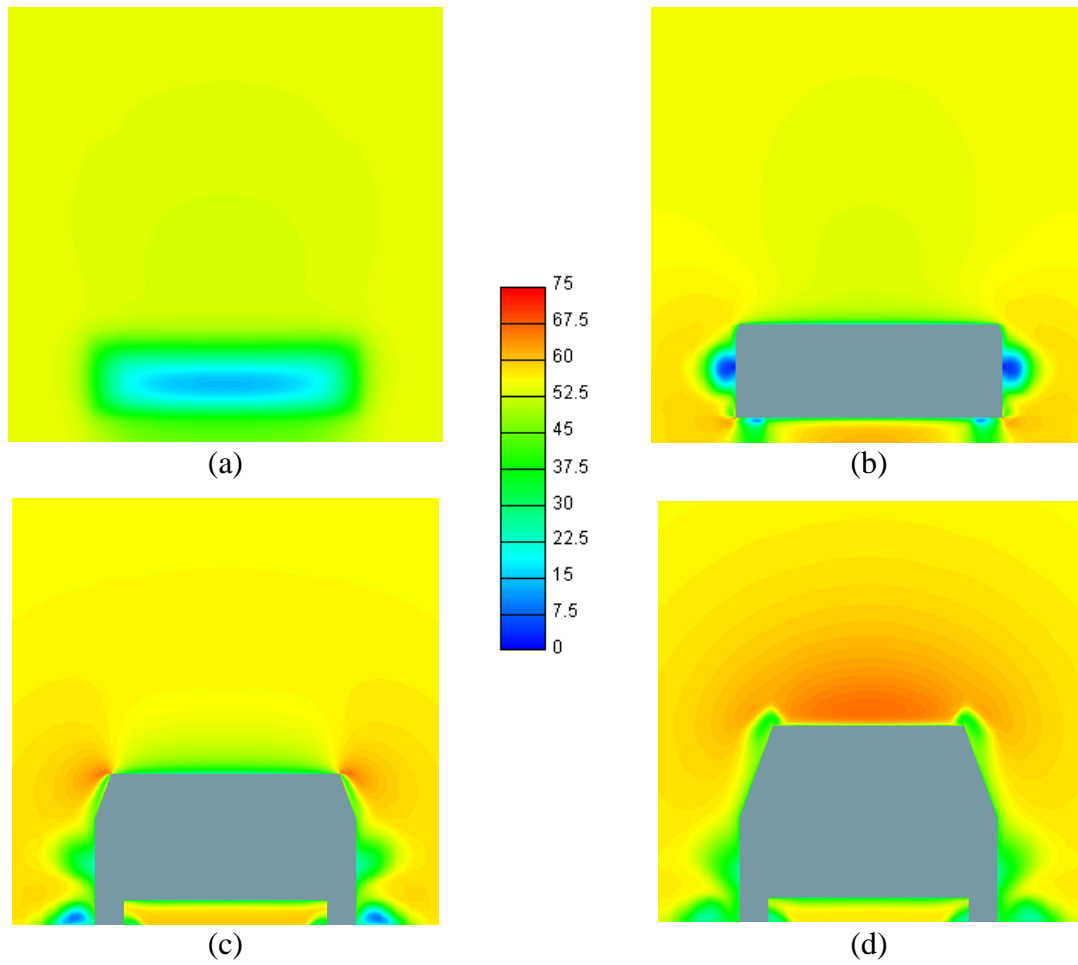
**Figura 3.12:** Contornos de presión [Pa] en carretera a 200 km/h. Plano de simetría.

#### 3.1.3.2 Contornos de velocidad bajo el coche



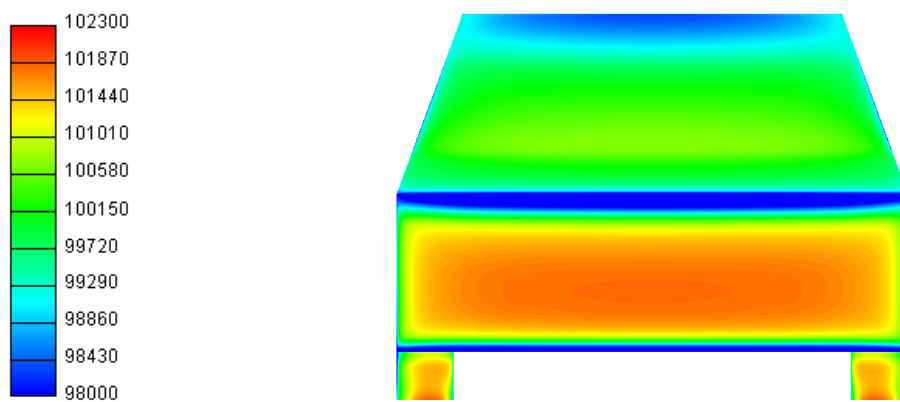
**Figura 3.13:** Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 200 km/h. Bajo el coche.

### 3.1.3.3 Contornos de velocidad en planos perpendiculares al plano de simetría



**Figura 3.14:** (a) Contornos de velocidad [m/s] en carretera a 200 km/h, a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (d) 2.45 m tras el frontal.

### 3.1.3.4 Contornos de presión en la superficie del coche



**Figura 3.15:** Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche en carretera, a 200 km/h.

### 3.1.4 Análisis del coche en carretera

#### **Flujo bajo el capó:**

Como se puede observar, en la entrada de aire bajo el capó (la zona frontal del vehículo) la velocidad se reduce y la presión aumenta al haber un punto de remanso.

El efecto de la presión en la parte frontal del coche es de importancia fundamental, ya que el flujo de aire que entre a través del radiador depende en gran medida de la sobrepresión en esa zona.

Aunque no se haya simulado la entrada de aire en esa zona, y por lo tanto esa presión no sea la real (ya que el aire entraría y la presión disminuiría), es muy útil para comparar la diferencia de comportamiento del aire en carretera o con soplante.

En todos los casos previos se aprecia una distribución de presiones relativamente uniforme en la zona frontal (excepto los bordes). Las ruedas delanteras también muestran una sobrepresión en su zona delantera.

#### **Flujo bajo el coche, ruedas y frenos:**

En todos los casos anteriores se aprecia un patrón muy similar del flujo, con una forma de cuña a medida que el aire se desplaza hacia atrás. Se aprecia que la velocidad del aire en los alrededores de las ruedas delanteras es mayor que en las traseras, y debido a esto, probablemente la refrigeración de las ruedas y frenos será mejor.

Se aprecia un incremento de la velocidad respecto a la corriente libre en esta zona. Este efecto es de gran utilidad para refrigerar el sistema de escape, ya que los efectos de transferencia de calor en general mejoran cuanto más turbulento sea el flujo. En este caso un aumento de la velocidad bajo el coche conducirá a una mayor turbulencia.

#### **Flujo alrededor de la cabina:**

Se observa que la velocidad alrededor de la cabina no es uniforme. En la zona del capó, la luna delantera y trasera, la velocidad es menor que la de la corriente libre, sin embargo, en la parte superior de la cabina es notablemente superior. La velocidad en los laterales del coche es menor que la de corriente libre, como se aprecia en la Figura 3.14.

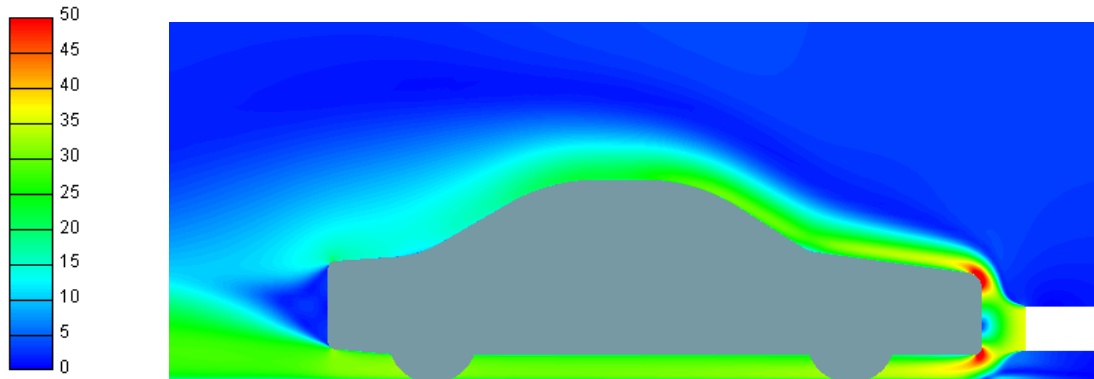
#### **Influencia de la velocidad:**

No hay diferencias cualitativas apreciables entre las tres velocidades estudiados a parte de la diferencia en la magnitud de las velocidades (nótese que las escalas son diferentes). Se observa que las zonas que eran bien refrigeradas a 200 km/h también lo son a 130 km/h y 160 km/h. También se observa que las zonas con sobrepresión son las mismas en los tres casos.

## 3.2 Soplante 1

### 3.2.1 Velocidad: 130 km/h

#### 3.2.1.1 Contornos de presión y velocidad en el plano de simetría

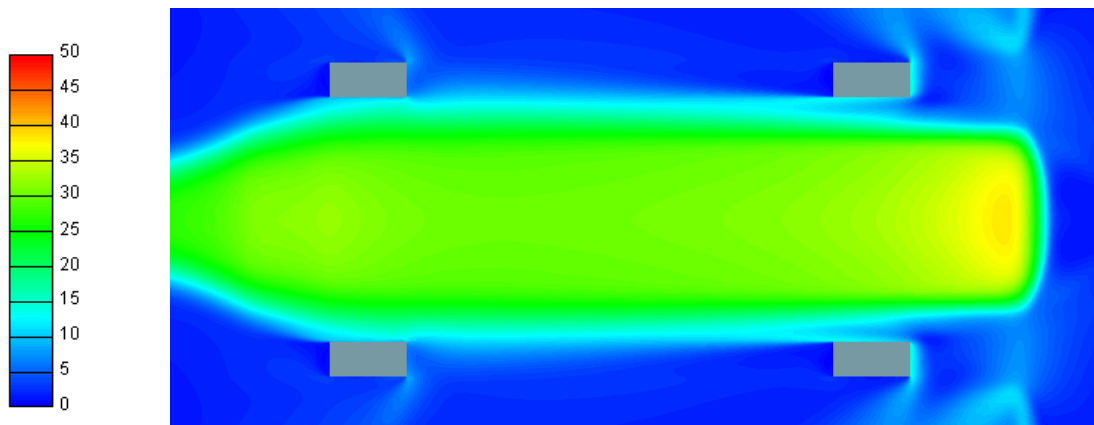


**Figura 3.16:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 1 a 130 km/h. Plano de simetría.



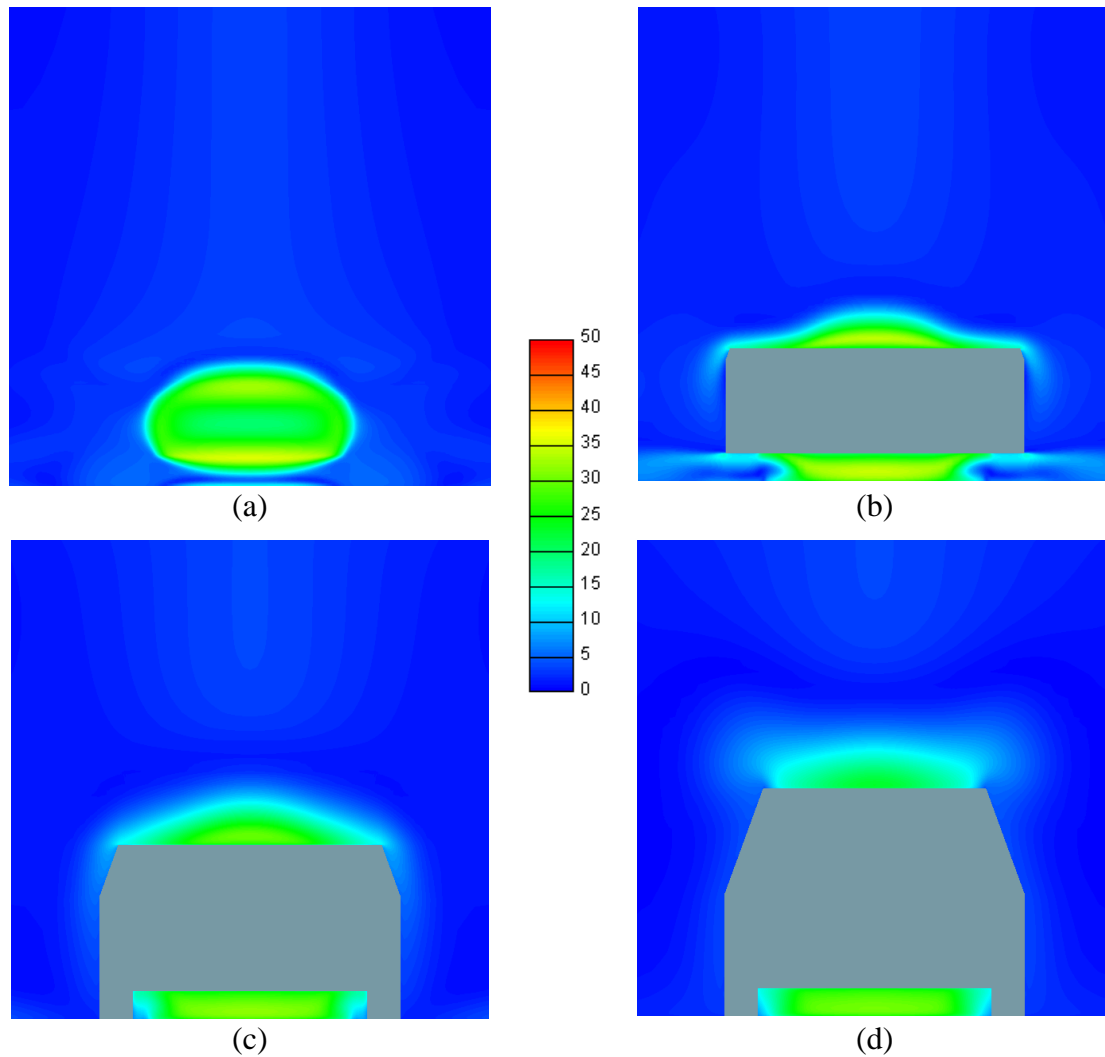
**Figura 3.17:** Contornos de presión [Pa], soplante 1 a 130 km/h. Plano de simetría.

#### 3.2.1.2 Contornos de velocidad bajo el coche



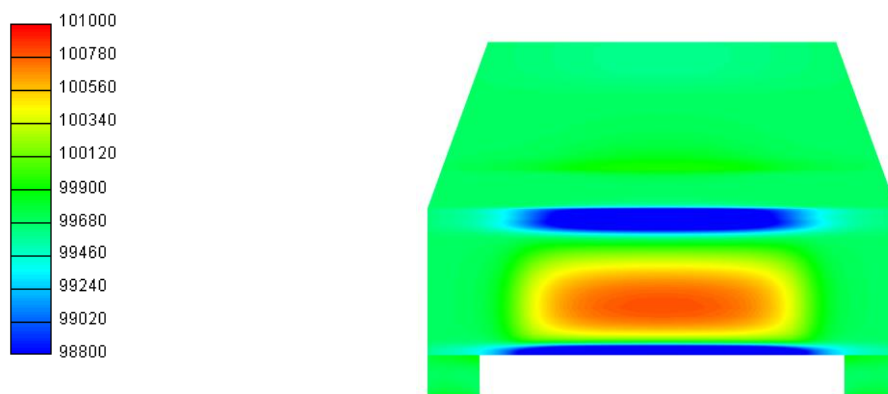
**Figura 3.18:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 1 a 130 km/h. Bajo el coche.

3.2.1.3 *Contornos de velocidad en planos perpendiculares al plano de simetría*



**Figura 3.19:** (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 1 a 130 km/h a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (b) 2.45 m tras el frontal.

3.2.1.4 *Contornos de presión en la superficie del coche*

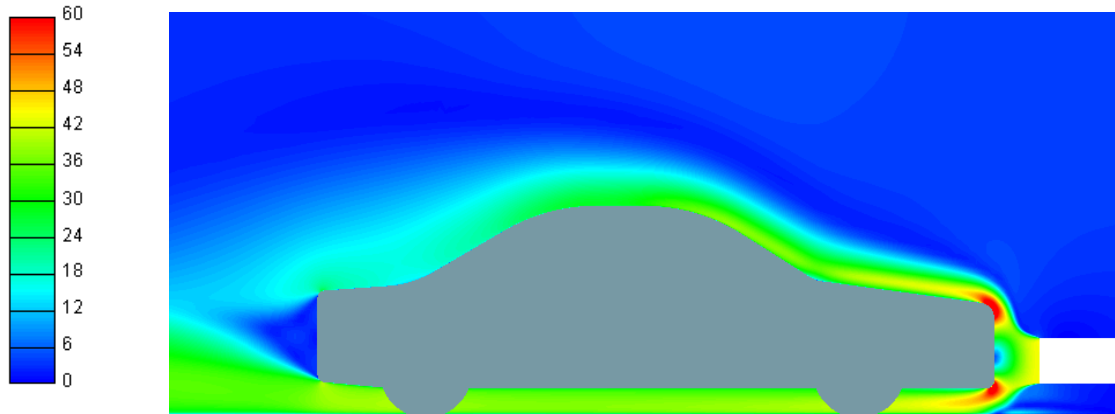


**Figura 3.20:** Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 1 a 130 km/h.



### 3.2.2 Velocidad: 160 km/h

#### 3.2.2.1 Contornos de presión y velocidad en el plano de simetría

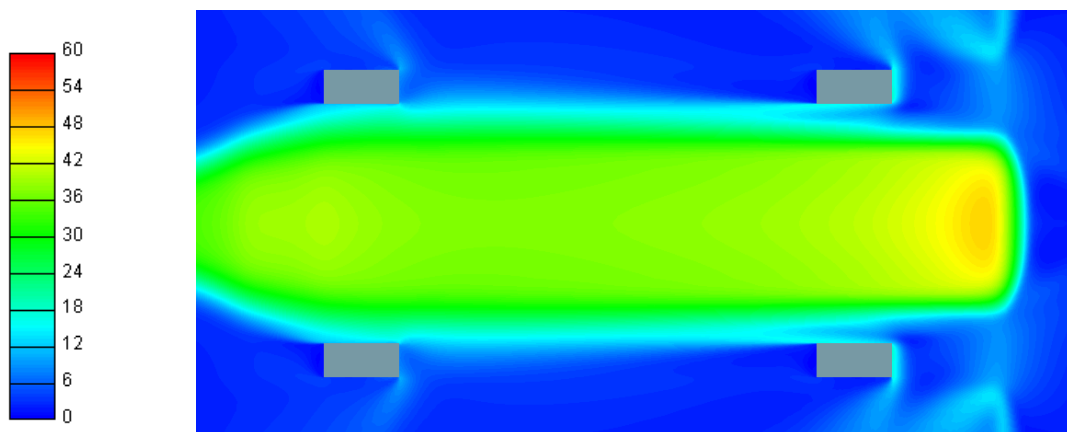


**Figura 3.21:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 1 a 160 km/h. Plano de simetría.



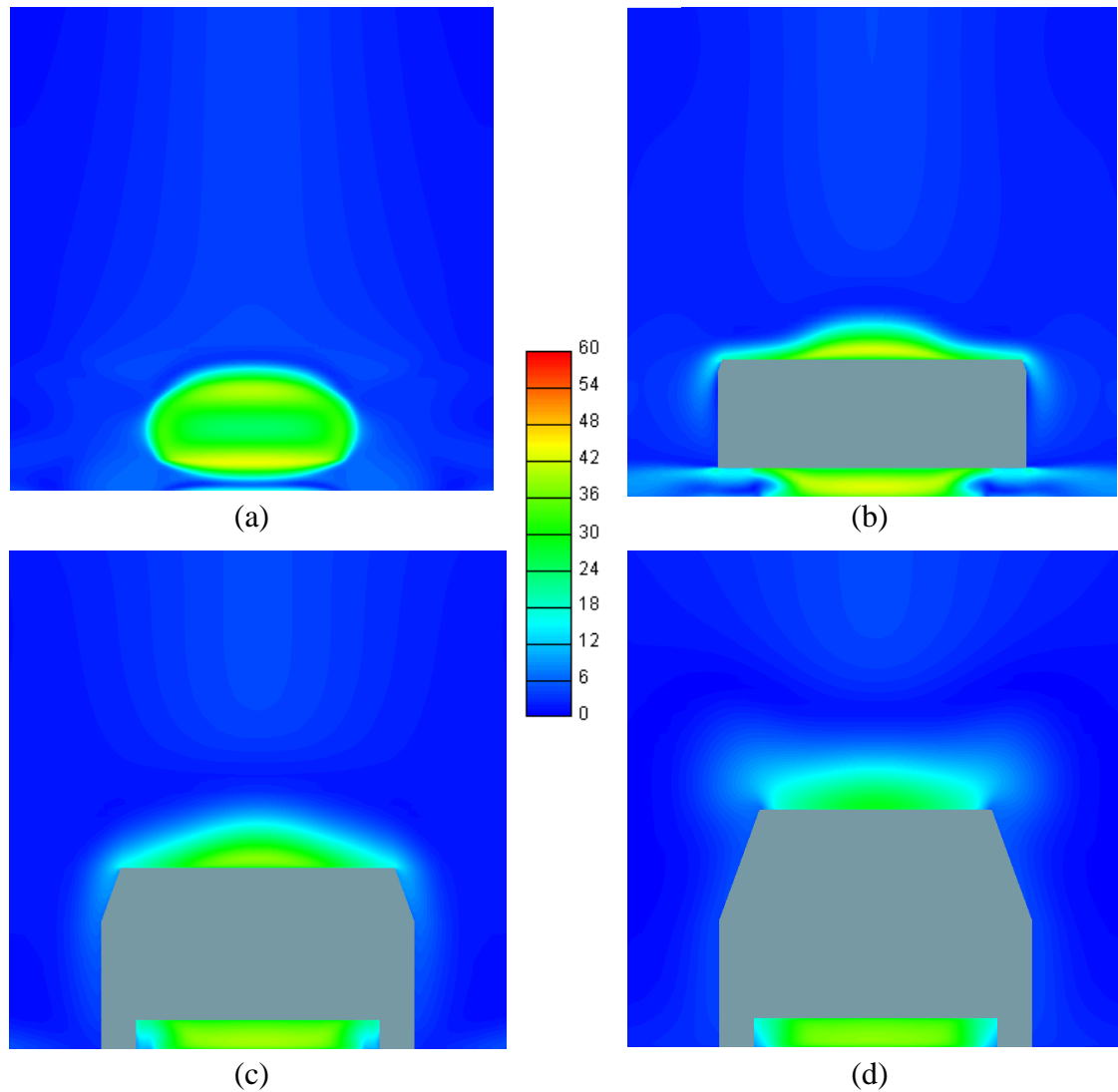
**Figura 3.22:** Contornos de presión [Pa], soplante 1 a 160 km/h, plano de simetría.

#### 3.2.2.2 Contornos de velocidad bajo el coche



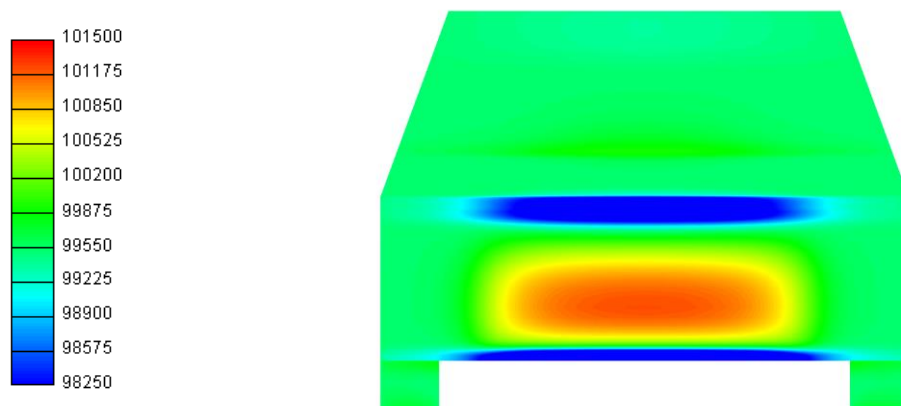
**Figura 3.23:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 1 a 160 km/h. Bajo el coche.

### 3.2.2.3 Contornos de velocidad en planos perpendiculares al plano de simetría



**Figura 3.24:** (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 1 a 160 km/h a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (d) 2.45 m tras el frontal.

### 3.2.2.4 Contornos de presión en la superficie del coche



**Figura 3.25:** Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 1 a 160 km/h.

### 3.2.3 Análisis de la soplante 1

#### **Flujo bajo el capó:**

El flujo de aire bajo el capó es simulado de manera aceptable por esta soplante, ya que consigue recrear unas presiones similares a las del coche en carretera, si bien en un área menor. Esta zona normalmente corresponde a la entrada de aire al radiador, por lo que es la más importante a efectos de refrigeración del motor.

Esta soplante sería por lo tanto adecuada para refrigerar esta zona del coche, si bien con ciertas limitaciones debido a que no se simula correctamente toda el área frontal, sino solo una cierta zona, que corresponde a la entrada de aire que refrigera el radiador.

#### **Flujo bajo el coche, ruedas y frenos:**

Esta soplante no es capaz de simular fielmente el flujo de aire bajo el capó debido a la poca área de salida de la soplante y a su colocación elevada sobre el suelo. Especialmente críticas son las ruedas delanteras, que son refrigeradas por una corriente de aire a mucha menor velocidad que en carretera, mientras que en las ruedas traseras esta diferencia no es tan acentuada.

Esta soplante no es por lo tanto adecuada para simular esta zona del coche. Especialmente problemático es el caso en el que se ensaye un coche a una gran potencia y se caliente mucho el sistema de escape. En tal caso, es probable que se necesite una refrigeración local de esta zona con otros medios.

#### **Flujo alrededor de la cabina:**

Se observa que la velocidad alrededor de la cabina es muy diferente al caso del coche en carretera. En general se aprecian velocidades mucho menores en todo el entorno del vehículo salvo en la parte frontal. La velocidad en los laterales del coche es prácticamente nula.

Los efectos de transferencia de calor a través de la luna y las ventanas del coche (los más importantes en el habitáculo) por lo tanto, son pobremente recreados al ser la velocidad tan baja, razón por la cual este tipo de soplantes no sirve para ensayos de I+D aeroclimáticos, donde se estudian estos efectos de transferencia de calor.

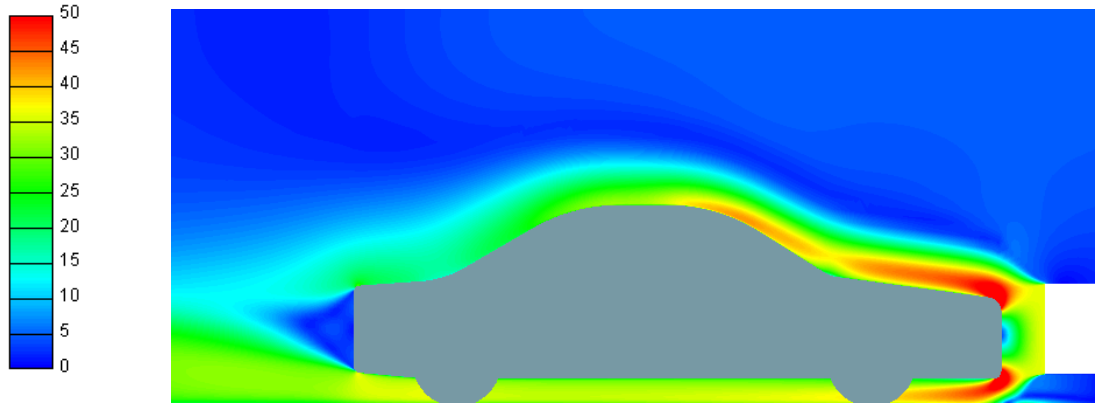
#### **Influencia de la velocidad:**

No hay diferencias cualitativas reseñables entre los dos casos estudiados, a 130 km/h y 160 km/h, a parte de la diferencia en la magnitud de las velocidades (nótese que las escalas son diferentes), tal y como ocurría en el caso del coche en carretera.

### 3.3 Soplante 2

#### 3.3.1 Distancia: 30 cm

##### 3.3.1.1 Contornos de presión y velocidad en el plano de simetría

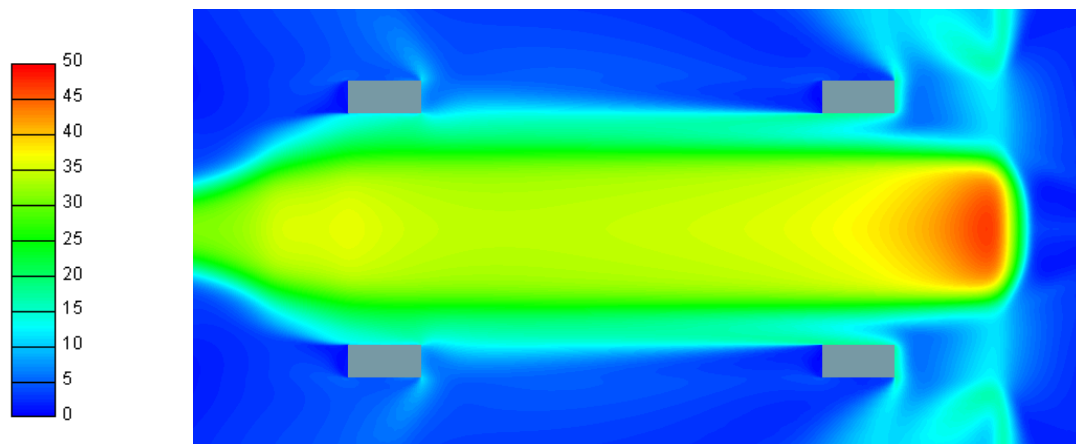


**Figura 3.26:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 2 a 30 cm. Plano de simetría.



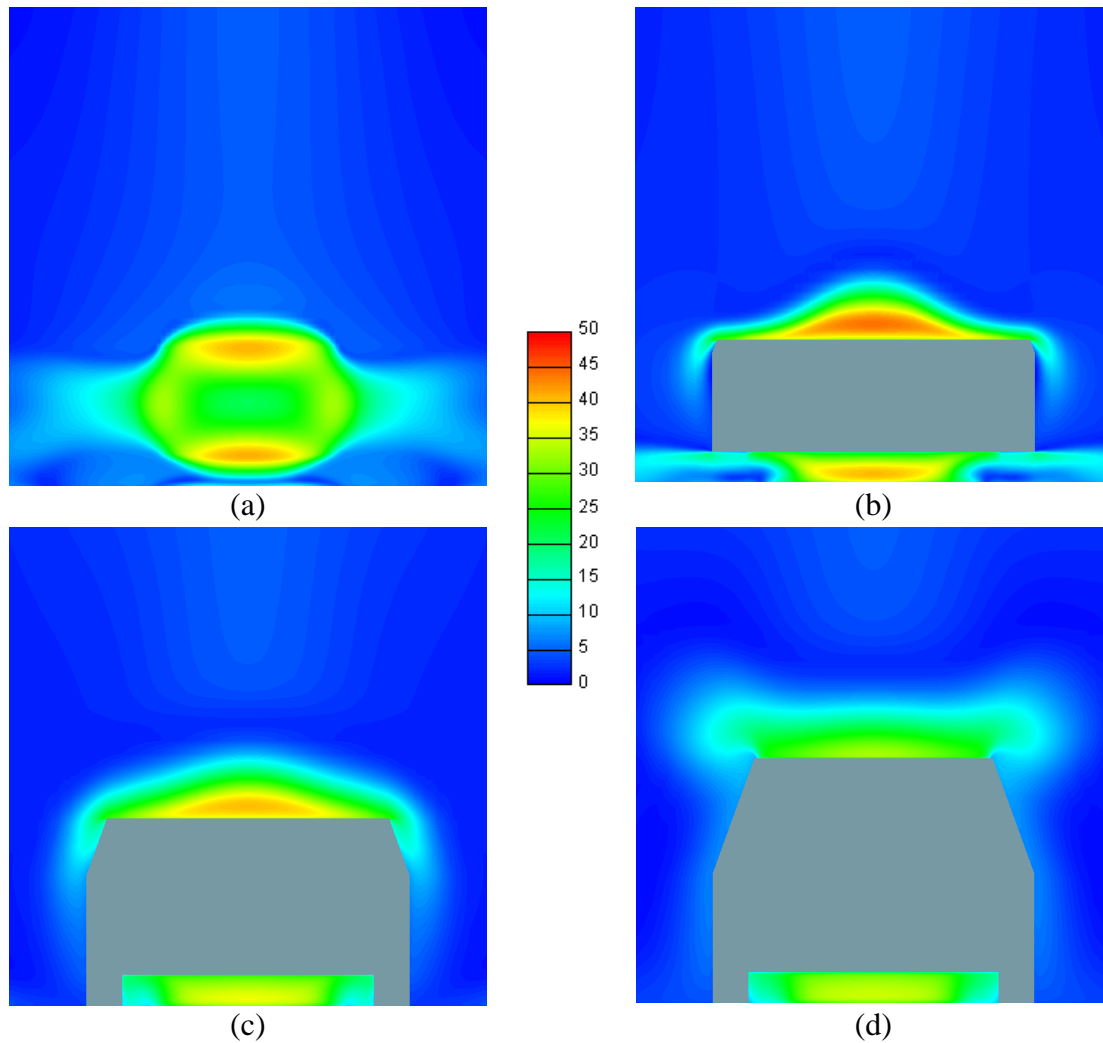
**Figura 3.27:** Contornos de presión [Pa], soplante 2 a 30 cm. Plano de simetría.

##### 3.3.1.2 Contornos de velocidad bajo el coche



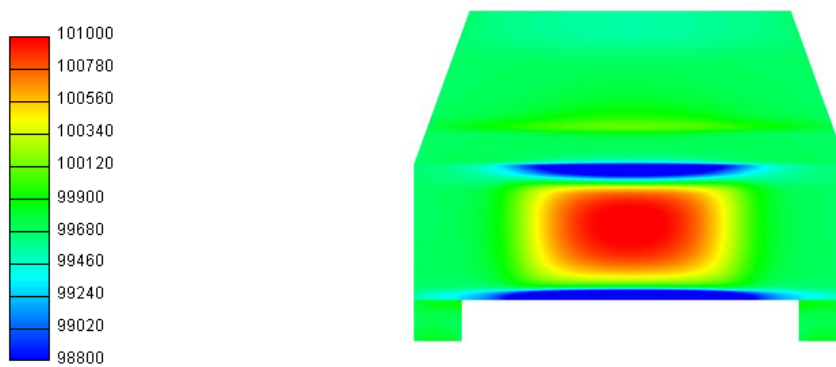
**Figura 3.28:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 2 a 30 cm. Bajo el coche.

### 3.3.1.3 Contornos de velocidad en planos perpendiculares al plano de simetría



**Figura 3.29:** (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 2 a 30 cm del coche a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (d) 2.45 m tras el frontal.

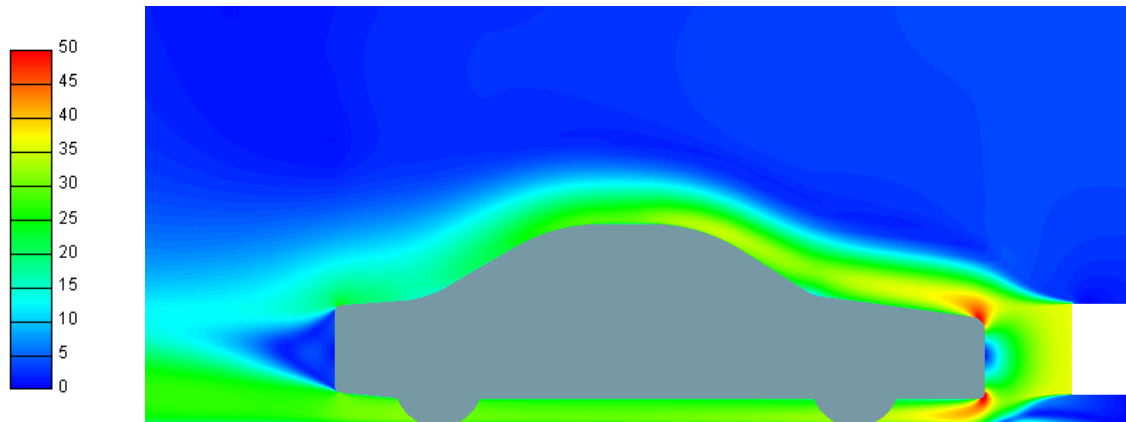
### 3.3.1.4 Contornos de presión en la superficie del coche



**Figura 3.30:** Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 2 a 30 cm.

### 3.3.2 Distancia: 60 cm

#### 3.3.2.1 Contornos de presión y velocidad en el plano de simetría

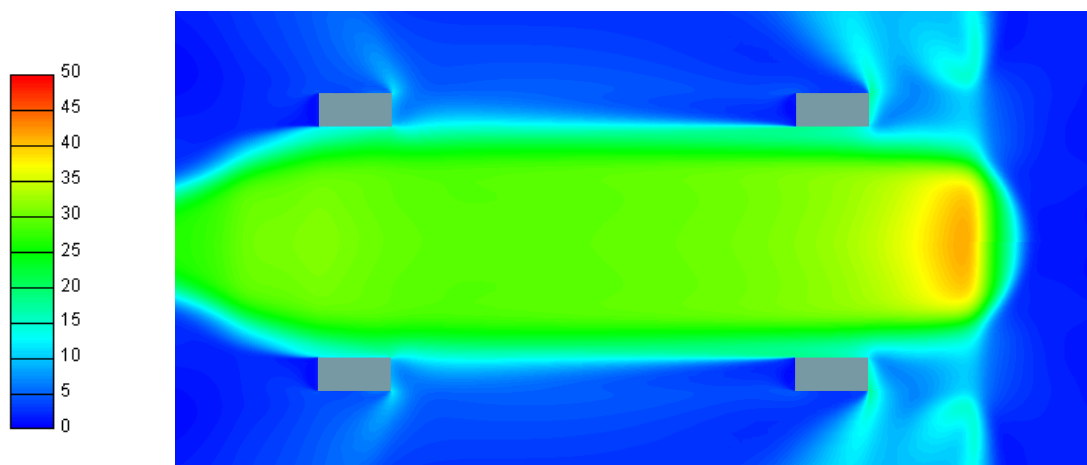


**Figura 3.31:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 2 a 60 cm. Plano de simetría.



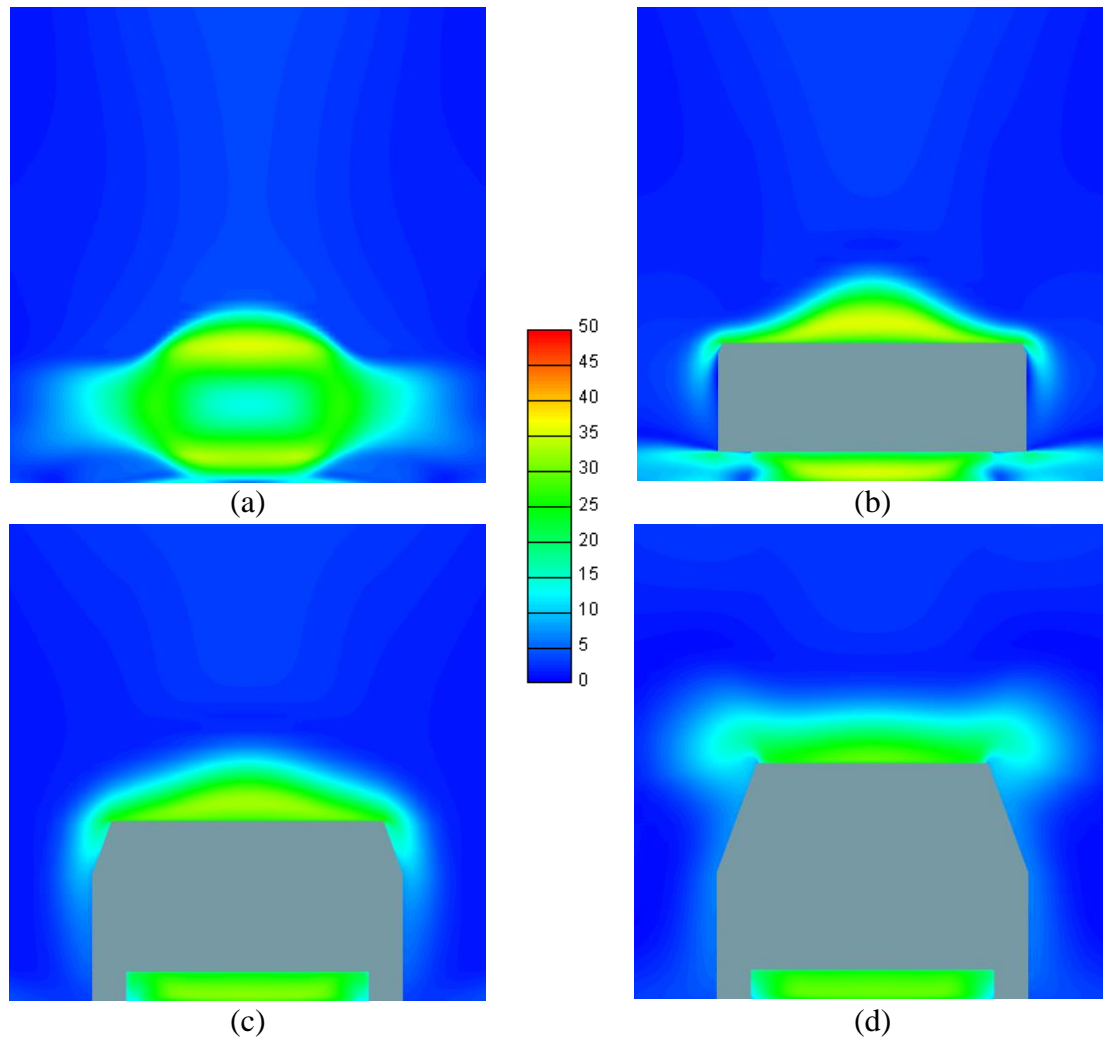
**Figura 3.32:** Contornos de presión [Pa], soplante 2 a 60 cm. Plano de simetría.

#### 3.3.2.2 Contornos de velocidad bajo el coche



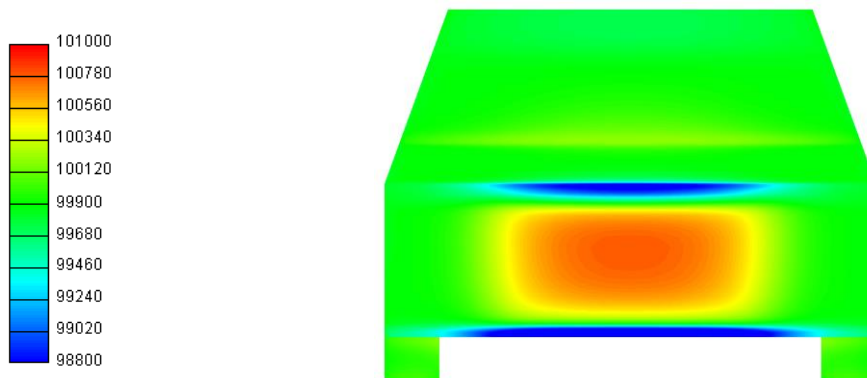
**Figura 3.33:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 2 a 60 cm. Bajo el coche.

### 3.3.2.3 Contornos de velocidad en planos perpendiculares al plano de simetría



**Figura 3.34:** (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 2 a 60 cm del coche a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (d) 2.45 m tras el frontal.

### 3.3.2.4 Contornos de presión en la superficie del coche



**Figura 3.35:** Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 2 a 60 cm.

### 3.3.3 Análisis de la soplante 2

#### **Flujo bajo el capó:**

El flujo de aire bajo el capó es simulado de manera aceptable por esta soplante, ya que consigue recrear unas presiones similares a las del coche en carretera, si bien en un área menor y con una sobrepresión notable cuando se coloca a 30 cm. Este hecho puede llevar a refrigerar demasiado esa zona. En comparación con la soplante 1, ésta refrigera una zona más alta y menos alargada del frontal del coche.

Se aprecia una clara mejora en la simulación el aire cuando la soplante se coloca a 60 cm, en este caso la sobrepresión en la zona frontal no es tan elevada y se parece más al caso del coche en carreta, además de cubrir un área de refrigeración más amplia.

#### **Flujo bajo el coche, ruedas y frenos:**

Esta soplante no es capaz de simular fielmente el flujo de aire bajo el capó debido a la poca área de salida de la soplante y a su colocación elevada sobre el suelo. Sin embargo, es capaz de realizar una mejor simulación que la soplante 1 en esta zona debido a que el aire alcanza mayores velocidades, sobre todo en la parte delantera, asemejándose más al flujo en carretera.

En este caso, la soplante a 30 cm es capaz de alcanzar mayores velocidades en esta zona, y por lo tanto una mejor simulación del flujo de aire.

#### **Flujo alrededor de la cabina:**

Se observa que la velocidad alrededor de la cabina es muy diferente al caso del coche en carretera. En general se aprecian velocidades mucho menores en la parte superior y en los laterales del vehículo (en esta zona la velocidad es prácticamente nula).

La parte superior del capó y la luna sin embargo muestran una excesiva velocidad cuando se coloca a 30 cm, fruto de una colocación demasiado cercana. Esta excesiva velocidad causará un incremento de los efectos de transferencia de calor a través de la luna delantera principalmente. Este efecto podría ser compensado o no por el déficit de velocidad en las ventanas y la luna trasera del habitáculo.

La soplante colocada a 60 cm reproduce mejor el flujo que a 30 cm, si bien en ningún caso el flujo alrededor de la cabina se reproduce fielmente.

#### **Influencia de la distancia al coche:**

La distancia al coche ha mostrado ser un parámetro más relevante que el cambio de velocidad a la hora de evaluar la calidad de la simulación del aire, como ya demostraron (Broatch, et al., 2017). La soplante a una distancia de 60 cm muestra unas velocidades y presiones más acordes al flujo en carretera en los alrededores del vehículo, salvo en su parte inferior (que disminuye demasiado).



### 3.4 Soplante 3

#### 3.4.1 Distancia: 30 cm

##### 3.4.1.1 Contornos de presión y velocidad en el plano de simetría

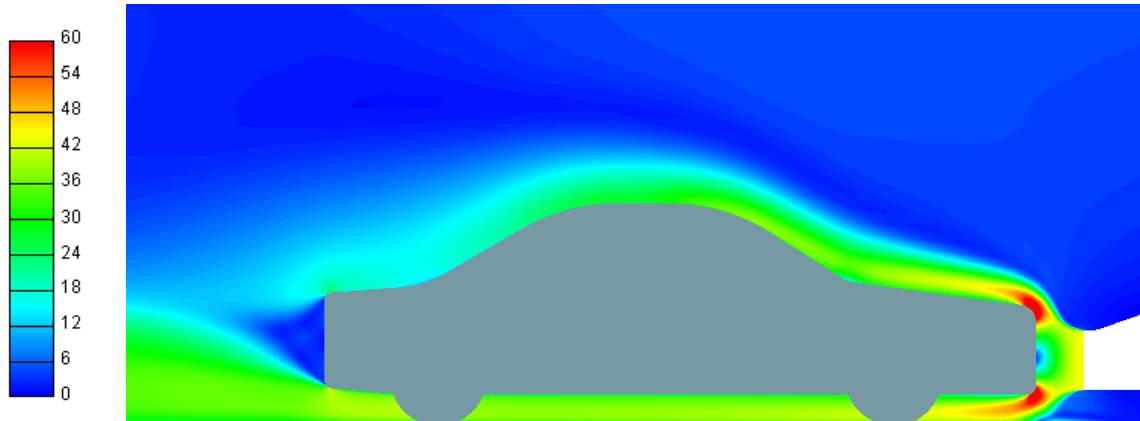


Figura 3.36: Contornos de velocidad [m/s], soplante 3 a 30 cm. Plano de simetría.



Figura 3.37: Contornos de presión [Pa], soplante 3 a 30 cm. Plano de simetría.

##### 3.4.1.2 Contornos de velocidad bajo el coche

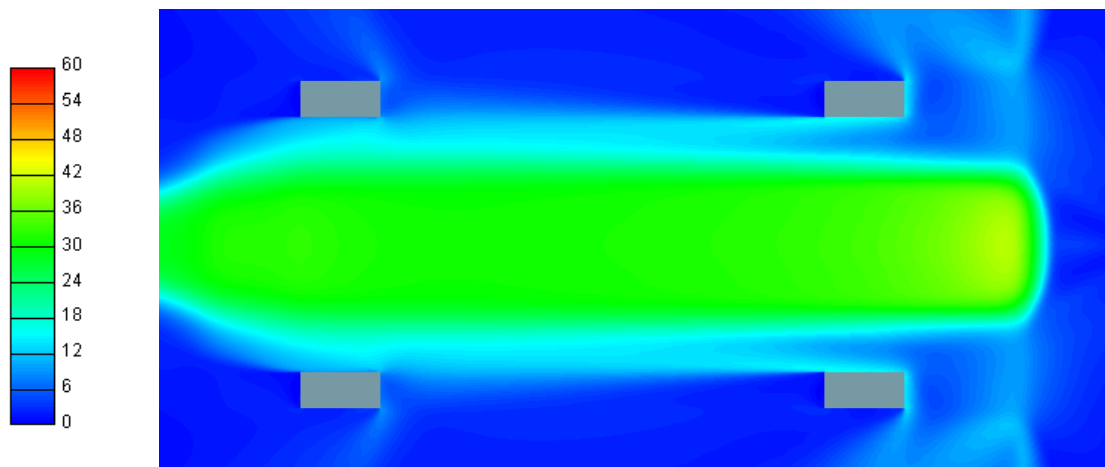
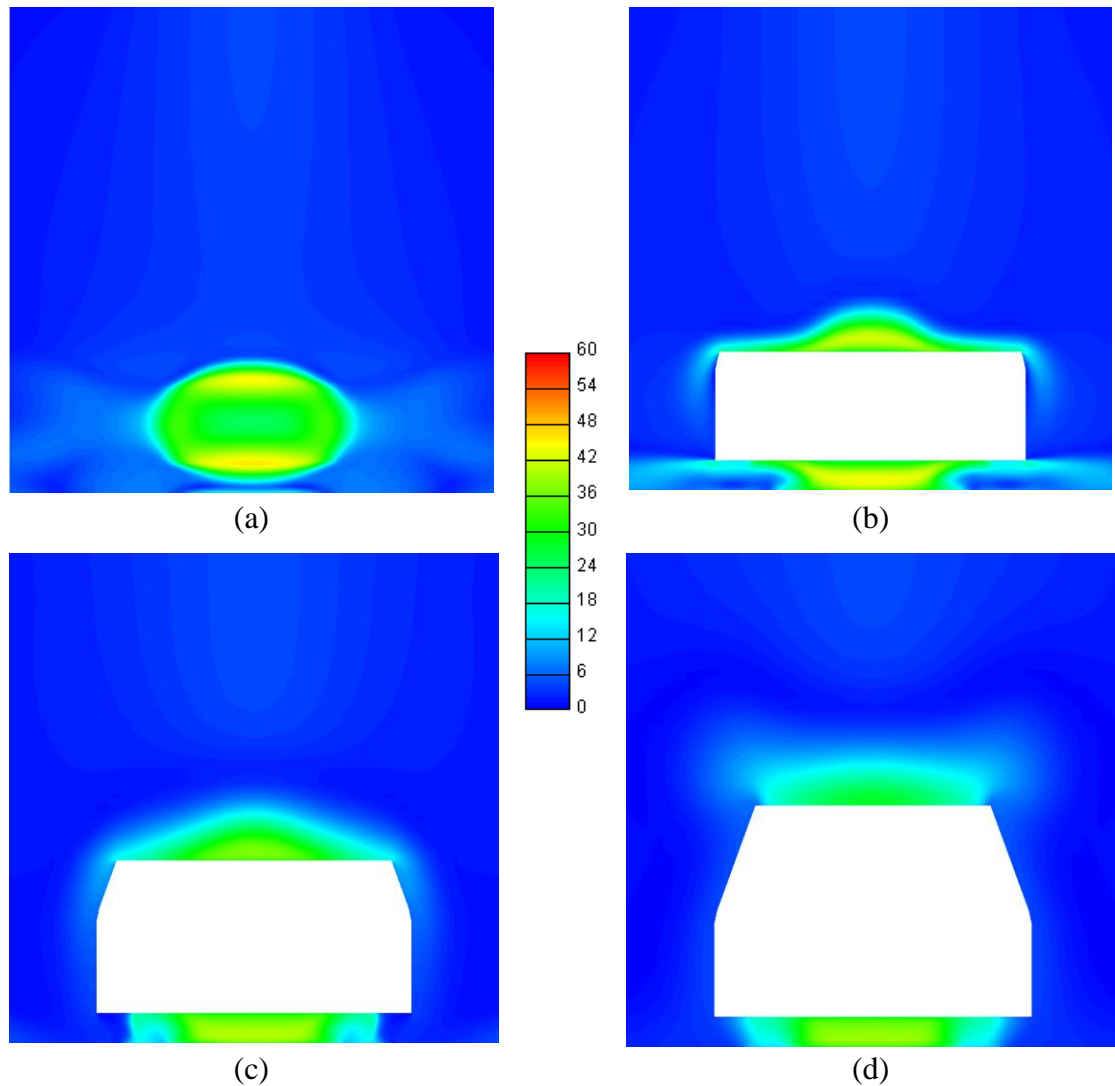


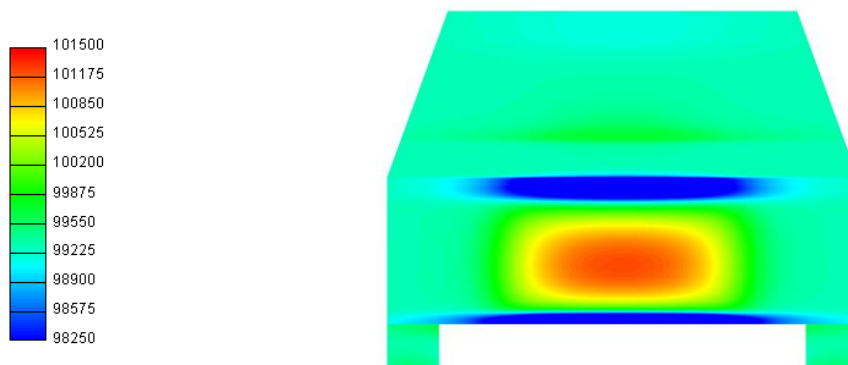
Figura 3.38: Contornos de velocidad [m/s], soplante 3 a 30 cm. Bajo el coche.

### 3.4.1.3 Contornos de velocidad en planos perpendiculares al plano de simetría



**Figura 3.39:** (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 3 a 30 cm del coche a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (d) 2.45 m tras el frontal.

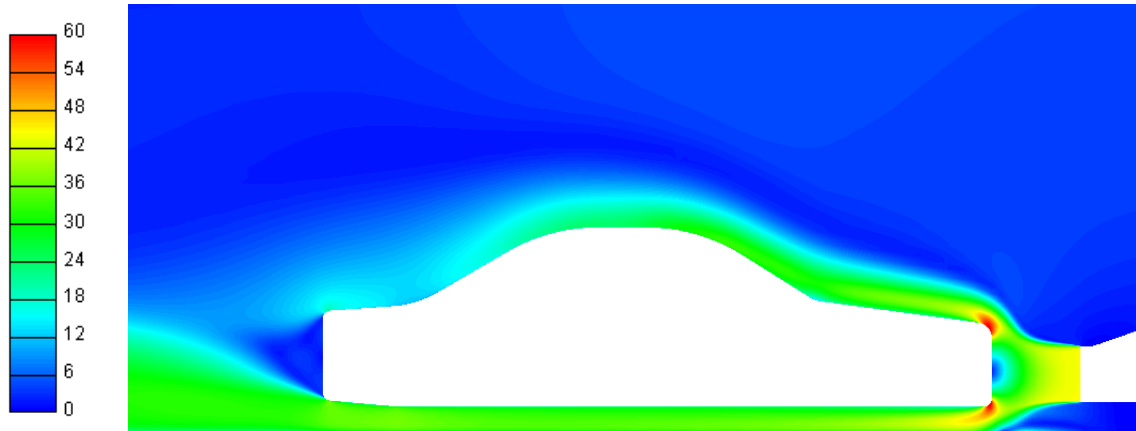
### 3.4.1.4 Contornos de presión en la superficie del coche



**Figura 3.40:** Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 3 a 30 cm.

### 3.4.2 Distancia: 60 cm

#### 3.4.2.1 Contornos de presión y velocidad en el plano de simetría

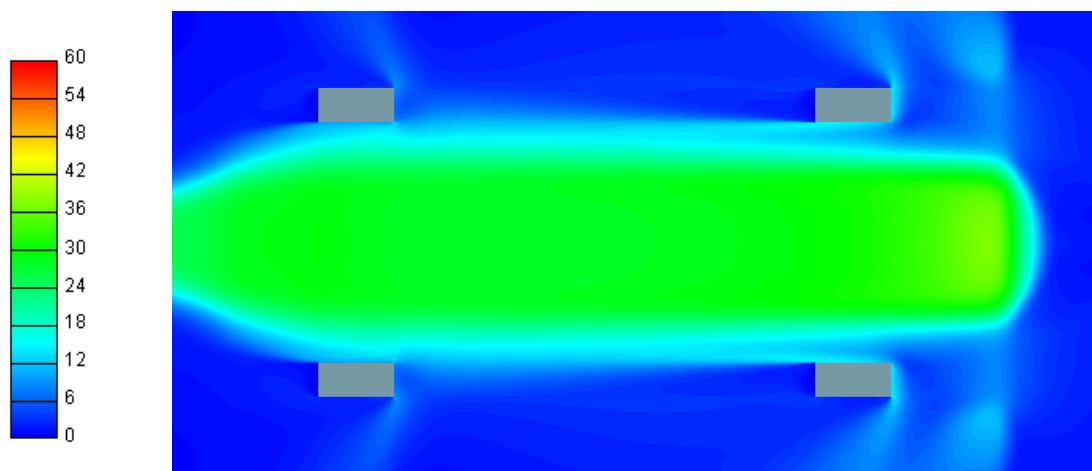


**Figura 3.41:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 3 a 60 cm. Plano de simetría.



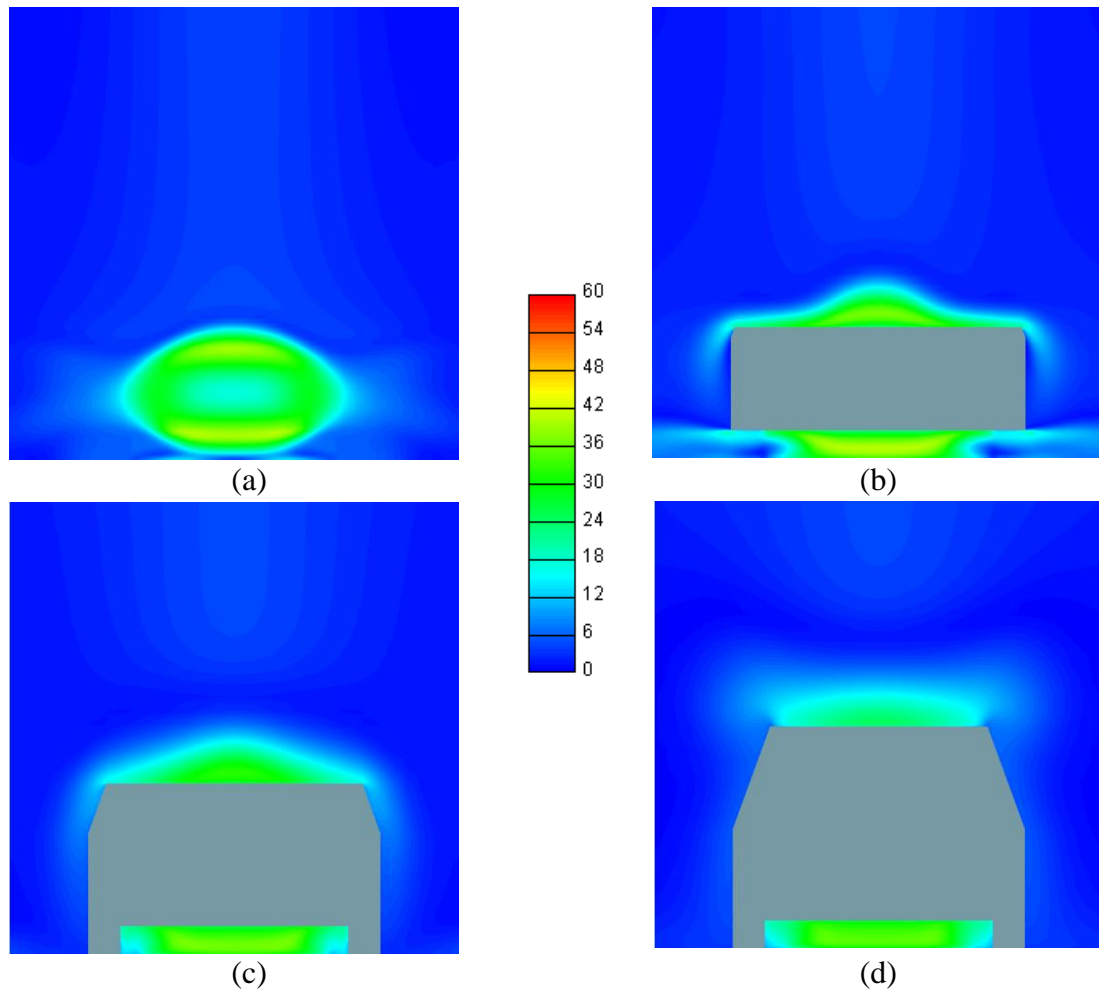
**Figura 3.42:** Contornos de presión [Pa], soplante 3 a 60 cm. Plano de simetría.

#### 3.4.2.2 Contornos de velocidad bajo el coche



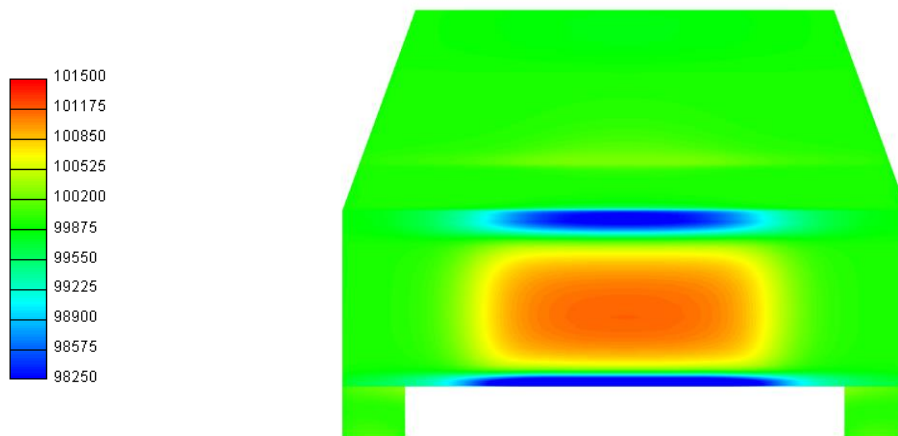
**Figura 3.43:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 3 a 60 cm. Bajo el coche.

3.4.2.3 *Contornos de velocidad en planos perpendiculares al plano de simetría*



**Figura 3.44:** (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 3 a 60 cm del coche a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (d) 2.45 m tras el frontal.

3.4.2.4 *Contornos de presión en la superficie del coche*



**Figura 3.45:** Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 3 a 60 cm.

### 3.4.3 Análisis de la soplante 3

#### **Flujo bajo el capó:**

Esta soplante simula el flujo bajo el capó aceptablemente, ya que consigue recrear unas presiones similares a las del caso en carretera, si bien en un área menor y con una ligera sobrepresión cuando se coloca a 30 cm. En comparación con la soplante 2, esta refrigera un área más pequeña (misma anchura, menor altura).

Se aprecia una mejoría en la simulación el aire cuando la soplante se coloca a 60 cm, al igual que en la soplante 1.

#### **Flujo bajo el coche, ruedas y frenos:**

Esta soplante es la que peor simula el aire bajo el coche de las que se llevan analizadas. Alcanza velocidades demasiado bajas en la parte inferior del coche comparada con el caso en carretera, e inferiores a la soplante 1 y 2.

En este caso, la soplante a 60 cm acentúa aún más el efecto al generar velocidades aún más bajas, por lo que hay que tener precaución de que se refrigere bien (si es necesario de manera auxiliar) el sistema de escape a la hora de realizar ensayos exigentes con el motor.

#### **Flujo alrededor de la cabina:**

Se observa que la velocidad alrededor de la cabina es bastante diferente al caso con coche en carretera. En general se aprecian velocidades mucho menores en la parte superior y en los laterales del vehículo, donde la velocidad es prácticamente nula.

La parte superior del capó y la luna muestran unas velocidades similares a las de la soplante 1, es decir, demasiado bajas.

La soplante colocada a 60 cm reproduce peor el flujo que a 30 cm, si bien en ningún caso el flujo alrededor de la cabina se reproduce de manera adecuada, por lo que no es adecuada para ensayos de I+D aeroclimáticos, al igual que la soplante 2.

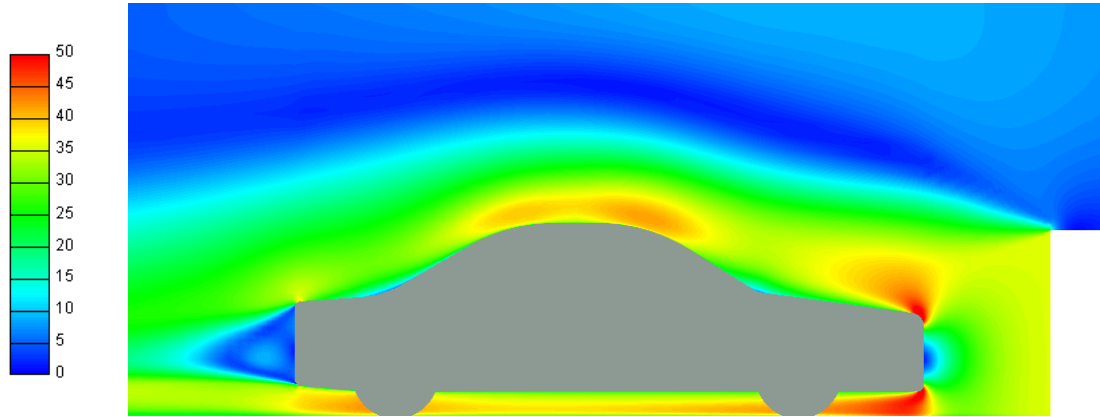
#### **Influencia de la distancia al coche:**

La distancia al coche es un parámetro importante a la hora de evaluar la correcta simulación del flujo, como pasaba en la soplante 2. En este caso también se aprecia una disminución de la presión en la parte frontal, y una reducción de la velocidad en la parte inferior del coche y el capó. A cambio, se simula de manera correcta un área mayor en la parte frontal.

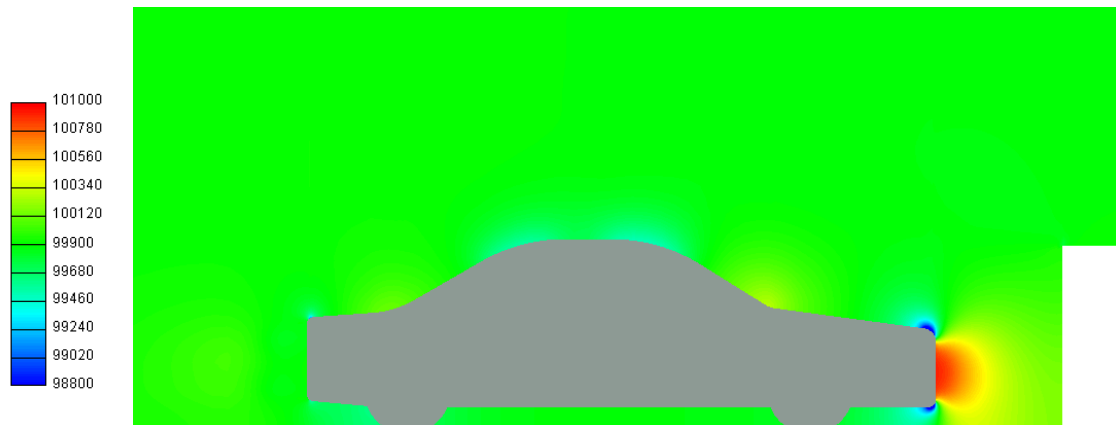
## 3.5 Soplante 4

### 3.5.1 Velocidad: 130 km/h

#### 3.5.1.1 Contornos de presión y velocidad en el plano de simetría

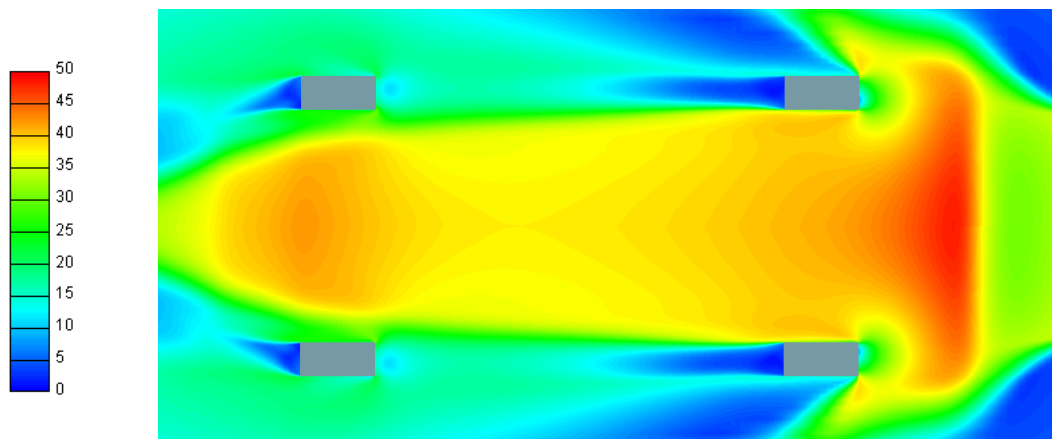


**Figura 3.46:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 4 a 130 km/h. Plano de simetría.



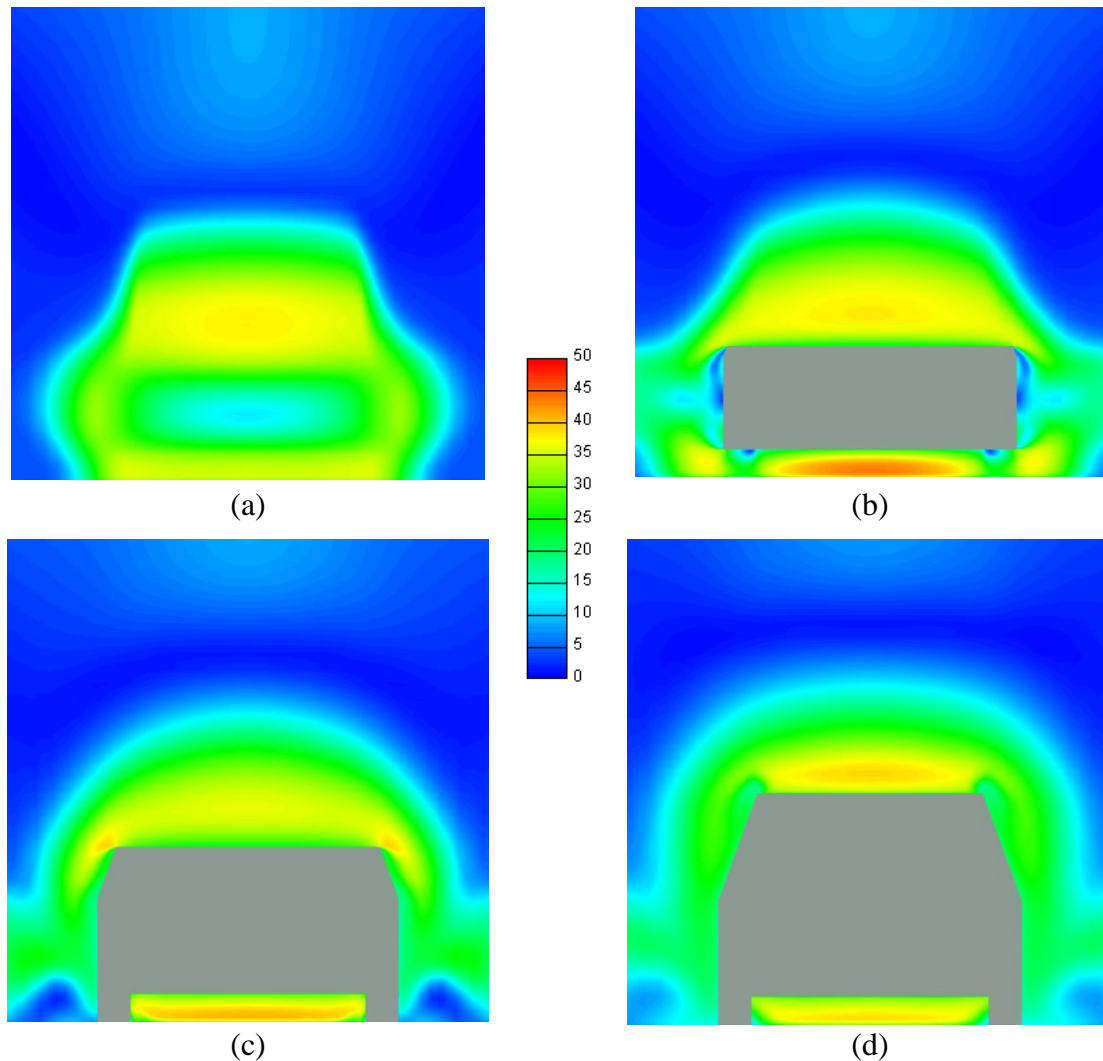
**Figura 3.47:** Contornos de presión [Pa], soplante 4 a 130 km/h. Plano de simetría.

#### 3.5.1.2 Contornos de velocidad bajo el coche



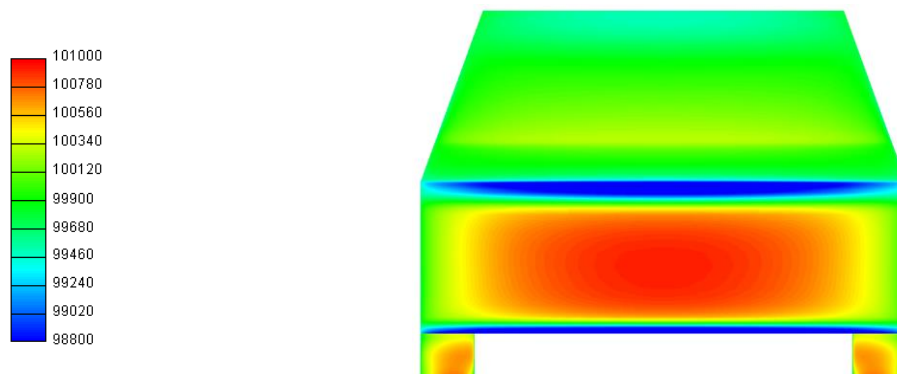
**Figura 3.48:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 4 a 130 km/h. Bajo el coche.

### 3.5.1.3 Contornos de velocidad en planos perpendiculares al plano de simetría



**Figura 3.49:** (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 4 a 130 km/h, a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (d) 2.45 m tras el frontal.

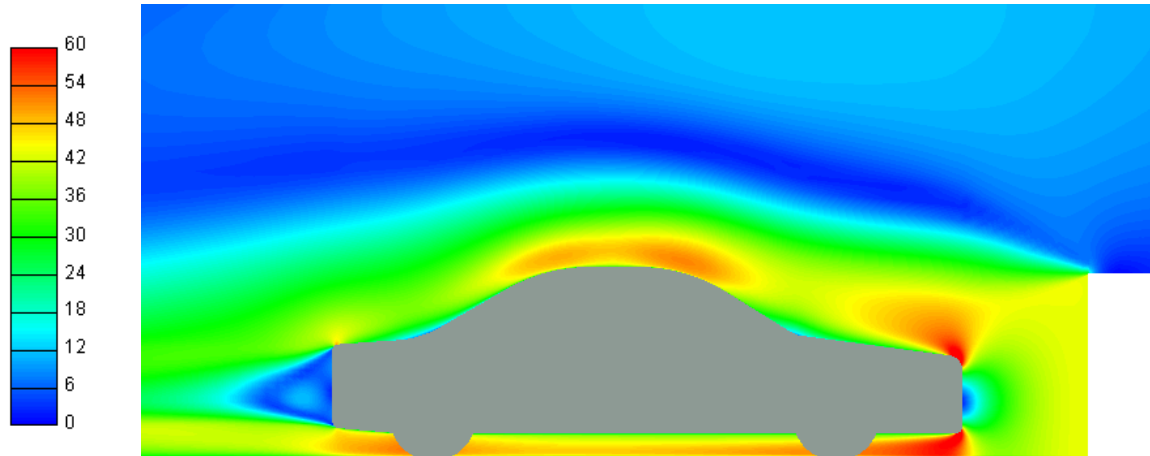
### 3.5.1.4 Contornos de presión en la superficie del coche



**Figura 3.50:** Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 4 a 130 km/h.

### 3.5.2 Velocidad: 160 km/h

#### 3.5.2.1 Contornos de presión y velocidad en el plano de simetría

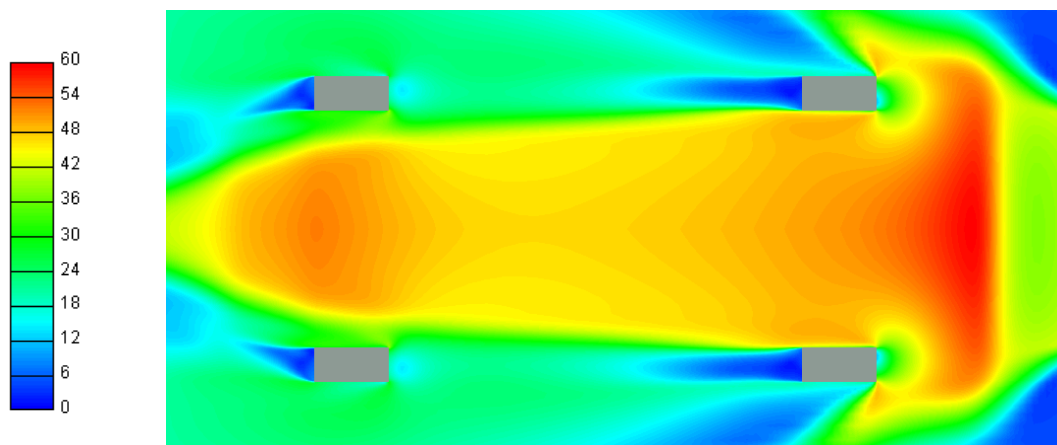


**Figura 3.51:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 4 a 160 km/h. Plano de simetría.



**Figura 3.52:** Contornos de presión [Pa], soplante 4 a 160 km/h. Plano de simetría.

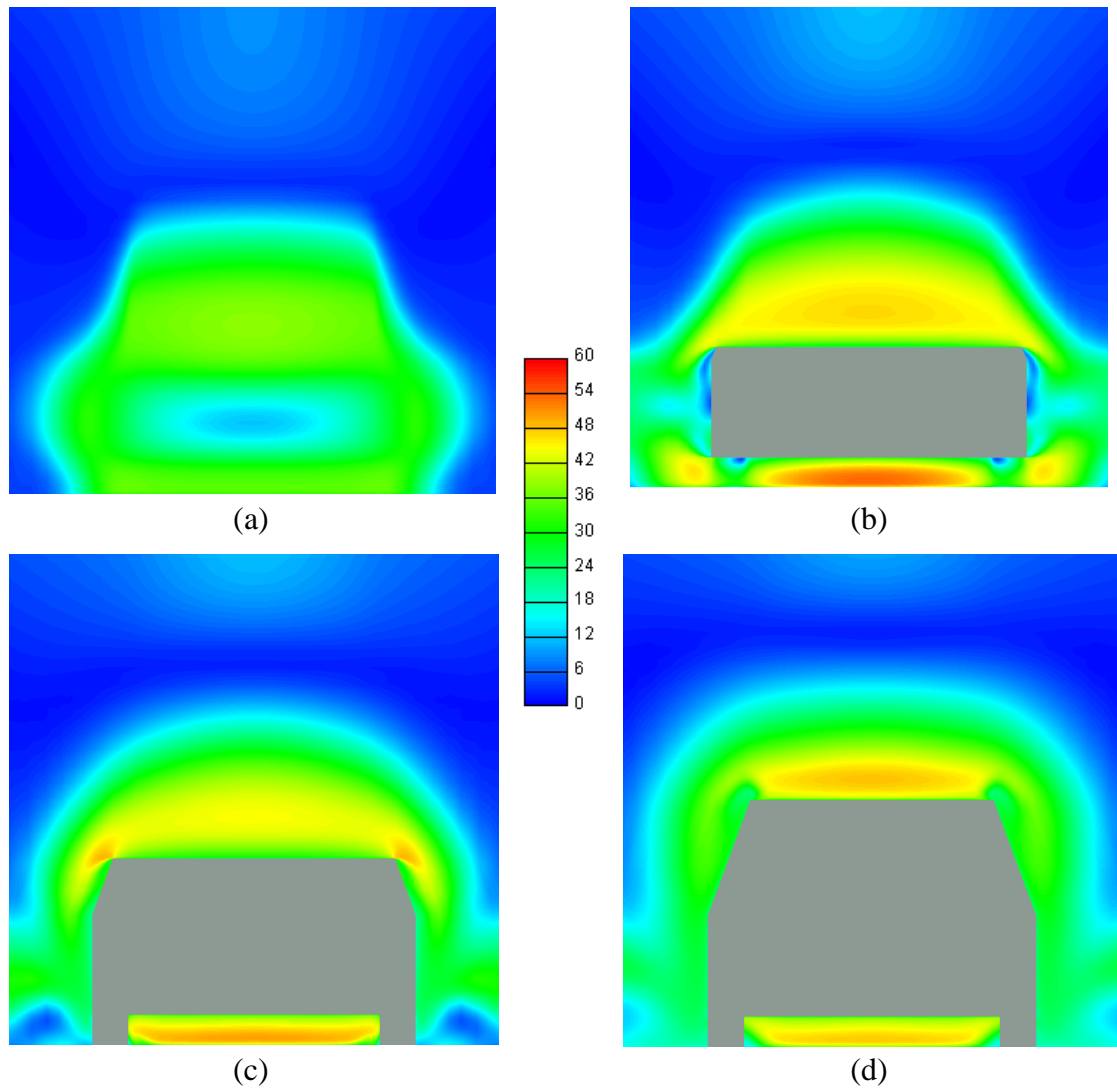
#### 3.5.2.2 Contornos de velocidad bajo el coche



**Figura 3.53:** Contornos de velocidad [m/s], soplante 4 a 160 km/h. Bajo el coche.

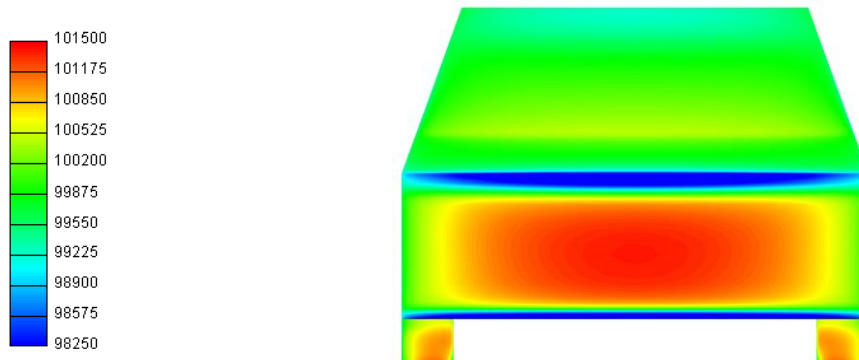


### 3.5.2.3 Contornos de velocidad en planos perpendiculares al plano de simetría



**Figura 3.54:** (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 4 a 160 km/h, a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (d) 2.45 m tras el frontal

### 3.5.2.4 Contornos de presión en la superficie del coche



**Figura 3.55:** Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 4 a 160 km/h

### 3.5.3 Velocidad: 200 km/h

#### 3.5.3.1 Contornos de presión y velocidad en el plano de simetría

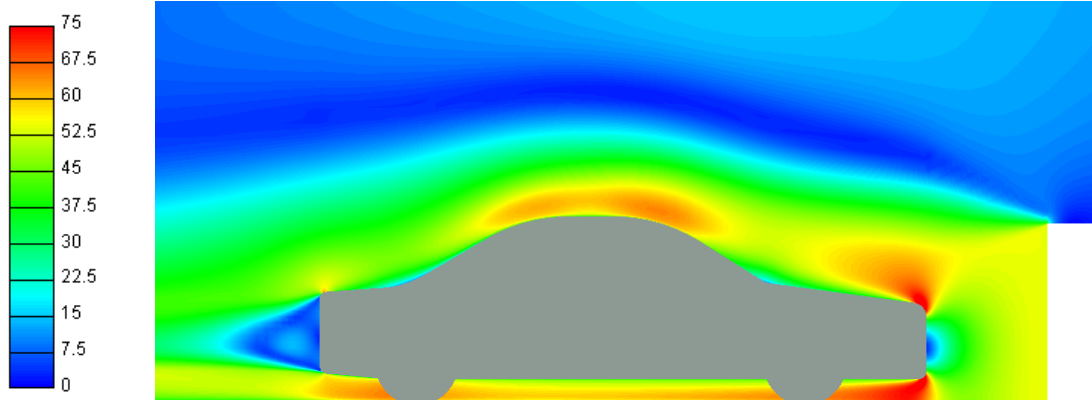


Figura 3.56: Contornos de velocidad [m/s], soplante 4 a 200 km/h. Plano de simetría.

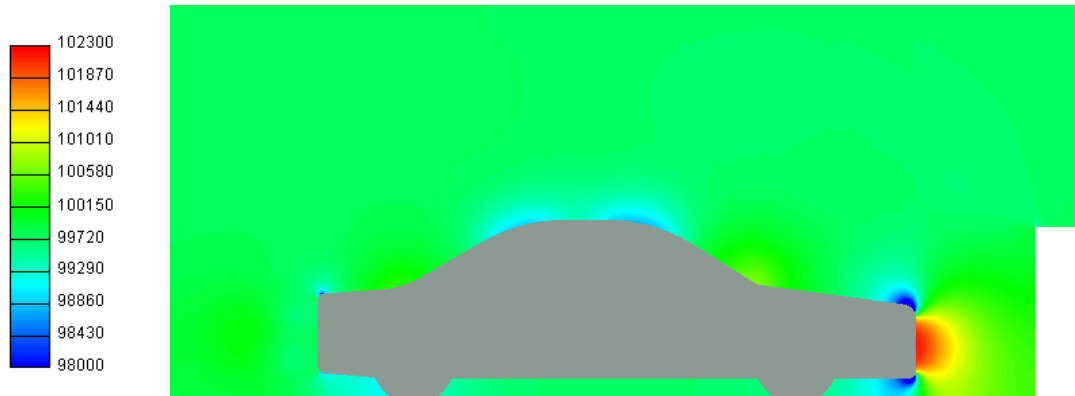


Figura 3.57: Contornos de presión [Pa], soplante 4 a 200 km/h. Plano de simetría.

#### 3.5.3.2 Contornos de velocidad bajo el coche

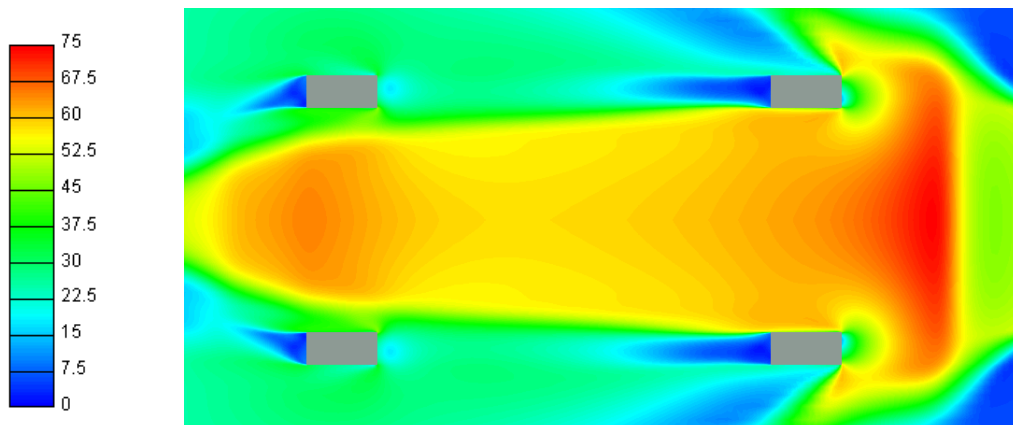
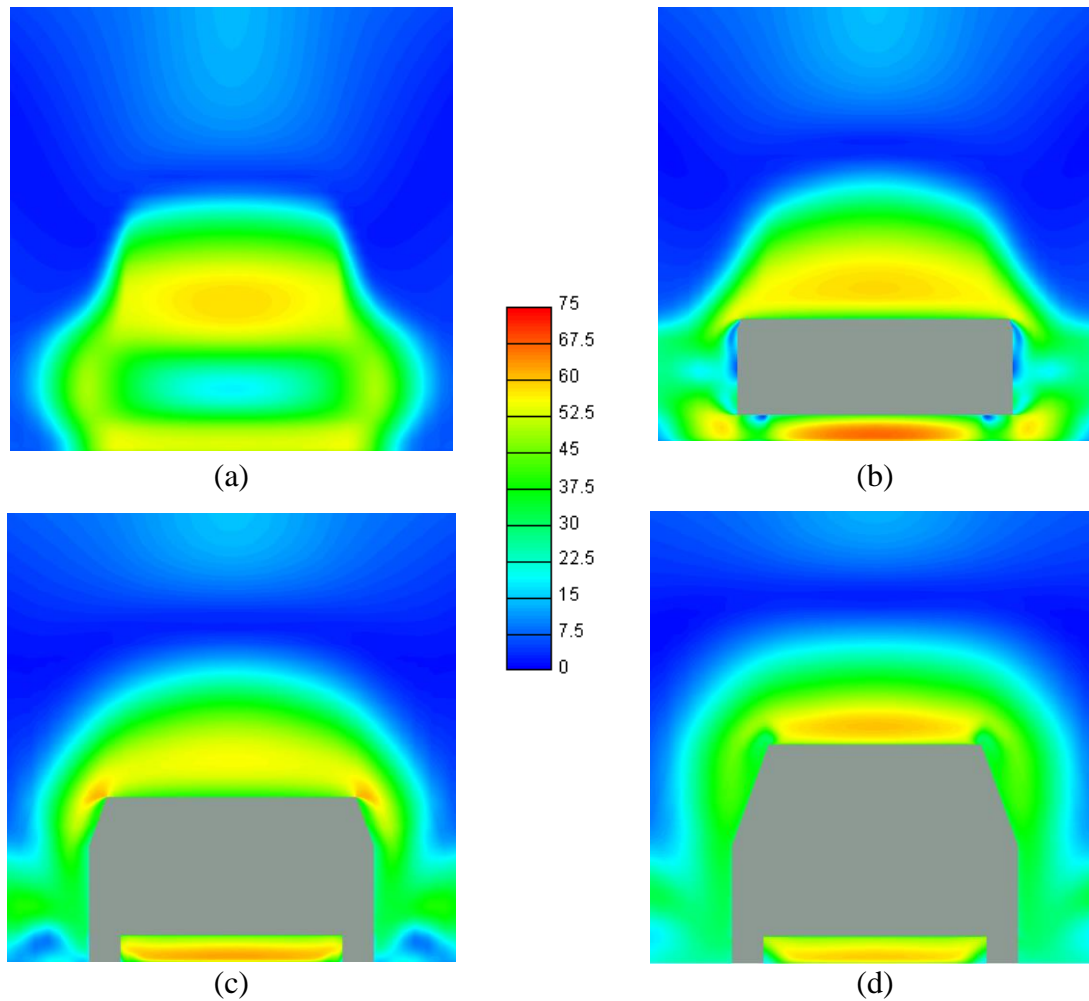


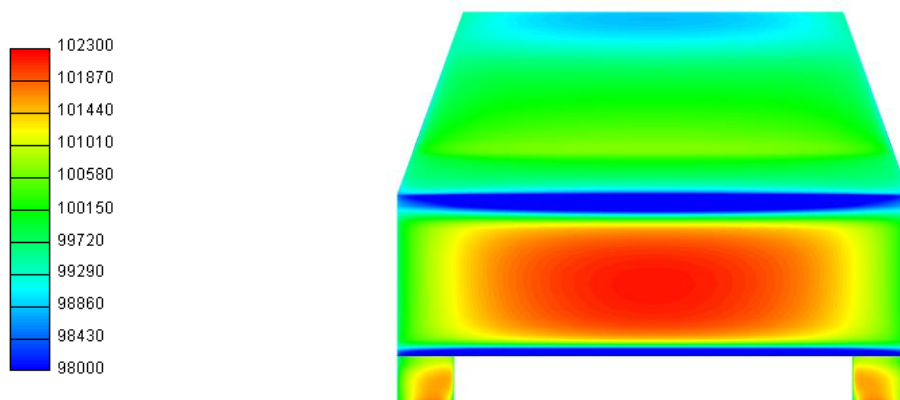
Figura 3.58: Contornos de velocidad [m/s], soplante 4 a 200 km/h. Bajo el coche.

### 3.5.3.3 Contornos de velocidad en planos perpendiculares al plano de simetría



**Figura 3.59:** (a) Contornos de velocidad [m/s] de la soplante 4 a 200 km/h, a 10 cm delante frontal del coche. (b) 0.6 m tras el frontal. (c) 1.45 m tras el frontal. (d) 2.45 m tras el frontal

### 3.5.3.4 Contornos de presión en la superficie del coche



**Figura 3.60:** Contornos de presión [Pa] en la superficie del coche con la soplante 4 a 200 km/h

### 3.5.4 Análisis de la soplante 4

#### **Flujo bajo el capó:**

El flujo de aire bajo el capó es simulado de manera muy buena por esta soplante, ya que consigue cubrir un área muy similar al coche en carretera, si bien la presión alcanzada con esta soplante es ligeramente más elevada de lo que debería. Este efecto podría paliarse alejando la soplante, tal y como se vio en la soplante 2 y 3.

#### **Flujo bajo el coche, ruedas y frenos:**

Esta soplante es capaz de simular fielmente el flujo de aire bajo el capó debido a la gran área de salida de la soplante y a su colocación a ras de suelo. Simula perfectamente la velocidad el aire en todas las ruedas y frenos, así como la corriente central de aire que transcurre entre ellas y que refrigera el sistema de escape.

Con este tipo de soplante se pueden realizar los ensayos más exigentes, al refrigerar perfectamente el sistema de escape.

#### **Flujo alrededor de la cabina:**

Se observa que la velocidad alrededor de la cabina es bastante parecida al caso en carretera, si bien en la zona superior del coche la velocidad es menor. Se observa también que esta soplante es la única que consigue simular algo de flujo de aire en el lateral del coche, aunque sin llegar lo suficientemente parecido al caso en carretera como para considerarlo bueno.

Con esta soplante se pueden realizar ensayos de I+D aeroclimáticos donde se estudien los fenómenos de transferencia de calor habitáculo-carrera, ya que las velocidades cerca de los cristales, especialmente la luna delantera, (donde mayor es la transferencia de calor (Sanaye & Dehghandokht, 2011)) se simulan de manera correcta.

#### **Influencia de la velocidad:**

No hay diferencias cualitativas reseñables entre los dos casos estudiados, a 130 km/h, 160 km/h y 200 km/h a parte de la diferencia en la magnitud de las velocidades, tal y como ocurría en el caso en carretera y la soplante 1.

## Capítulo 4

---

### CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Master se han analizado cuatro soplantes utilizadas para refrigerar vehículos en salas de banco de rodillos. Para ello se ha construido un modelo computacional con ayuda del software AVL FIRE.

Una vez definido el modelo se ha procedido a realizar las simulaciones numéricas y a la extracción de los resultados más relevantes de éstas. A continuación, se resumen las conclusiones obtenidas para cada soplante.

#### **Soplante 1, soplante 2 y soplante 3:**

Aceptable simulación de la parte frontal del vehículo, mala simulación del resto de zonas. Recomendadas sólo para hacer ensayos de emisiones o ensayos de I+D donde no se requiera refrigerar de manera precisa partes que no sean el motor, radiador, y el resto de elementos bajo el capó. En especial, no se deben usar para ensayos aeroclimáticos, donde el flujo alrededor del habitáculo debe ser lo más fiel posible a la realidad.

Las soplantes 2 y 3 muestran una ligera mejora en la simulación de las presiones en el frontal del coche cuando se colocan a 60 cm, pero empeora la simulación del flujo bajo el coche. En el caso de la soplante 2, ponerla a 60 cm supone también mejorar el flujo alrededor del habitáculo (capó y luna principalmente), pero en el caso de la soplante 3 no existe esa mejoría.

#### **Soplante 4:**

Buena simulación de la parte frontal del vehículo y del resto de zonas, salvo el flujo en los laterales del vehículo, donde la simulación es regular. Recomendada para cualquier tipo de ensayo, ya sea emisiones o I+D dada su capacidad para simular la gran mayoría de zonas de interés.

A continuación, se presenta una tabla resumen de las conclusiones obtenidas para cada soplante:

**Tabla 4.1:** Tabla resumen de la calidad de la simulación del flujo de cada soplante

<b>Flujo</b>	<b>Soplante 1</b>	<b>Soplante 2</b>	<b>Soplante 3</b>	<b>Soplante 4</b>
Bajo el capó	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Buena
Ruedas, frenos, escape	Mala	Mala	Mala	Buena
Cabina	Mala	Mala	Mala	Buena

Se ha observado también que la velocidad a la que se pruebe la soplante no es un factor influyente en la calidad de la simulación del aire por parte de la soplante (en el rango estudiado, 130-200km/h). Si una soplante es capaz de simular correctamente el flujo a 130 km/h, también lo hará a 200 y al revés.

Sin embargo, la distancia si es un factor influyente, tal y como se vio en la soplante 2 y 3 al variar la distancia al vehículo. Una mayor distancia implica menores presiones en la parte frontal, mayor área simulada correctamente por el aire en la zona frontal, y peor simulación del flujo bajo el coche al disminuir la velocidad bajo él.

#### Propuestas de trabajos futuros:

- Modelar y simular las soplantes completas desde la salida de la voluta para evaluar la homogeneidad del aire con distintas formas de la boca de salida.
- Simular el calor desprendido por el coche y el calentamiento del aire en la sala para obtener un modelo realista del comportamiento del coche en una sala de ensayos.

---

## REFERENCIAS

**Britcher, C. & Stephenson, P., 2005.** *Aerodynamic calibration of an automotive climatic wind tunnel.* s.l., s.n.

**Broatch, A. y otros, 2017.** Definition of wind blowers for vehicles testing at chassis-dyno facilities using a CFD approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment.*

**Crespo, A., 2006.** *Mecánica de fluidos.* Madrid: Paraninfo.

**Fernandez Oro, J. M., 2012.** *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos.* Barcelona: Reverté.

**Fernández-Yanez, P., Armas, O. & Martínez-Martínez, S., 2016.** Impact of relative position vehicle-wind blower in a roller test bench. *Applied Thermal Engineering.*

**Galindo, E. y otros, 2017.** *Chassis Dynamometer Testing.* s.l.:SAE International.

**Jama, H., Watkins, S. & Dixon, C., 2004.** *Airflow distribution through the radiator of a typical Australian passenger car..* Sydney, s.n.

**Khaled, M., Harambat, P. & Peerhossaini, H., 2011.** Towards the control of car underhood thermal conditions. *Applied Thermal Engineering.*

**Sanaye, S. & Dehghandokht, M., 2011.** Thermal modeling for predication of automobile cabin air temperature. *International Journal of Automotive Engineering.*

**Singh, A. & Pal Singh, S., 2016.** Design and Simulate an Aerodynamic Car Body for The Maruti Suzuki 800 With Less Coefficient of Drag. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET).*