



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGIAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA OPTIMIZACIÓN DEL
COEFICIENTE AERODINÁMICO DE UN VEHÍCULO MEDIANTE EL
CONTROL DE LA TEMPERATURA DE SUS SUPERFICIES

Autor: Javier Puente Sánchez

Director: Juan Norverto Moriño

Madrid

Julio de 2019

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Javier Puente Sánchez

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA OPTIMIZACIÓN DEL COEFICIENTE AERODINÁMICO DE UN VEHÍCULO, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a8..... de Julio..... de2019.

ACEPTA



Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA OPTIMIZACIÓN DEL COEFICIENTE AERODINÁMICO DE UN VEHÍCULO
MEDIANTE EL CONTROL DE LA TEMPERATURA DE SUS SUPERFICIES

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico...2018/2019... es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Javier Puente Sánchez Fecha: ..08 / ..07 / ..2019

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Juan Norverto Morínigo Fecha: 8 / 7 / 2019





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA OPTIMIZACIÓN DEL
COEFICIENTE AERODINÁMICO DE UN VEHÍCULO MEDIANTE EL
CONTROL DE LA TEMPERATURA DE SUS SUPERFICIES

Autor: Javier Puente Sánchez

Director: Juan Norverto Moriño

Madrid

Julio de 2019

ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA OPTIMIZACIÓN DEL COEFICIENTE AERODINÁMICO DE UN VEHÍCULO MEDIANTE EL CONTROL DE LA TEMPERATURA DE SUS SUPERFICIES

Autor: Puente Sánchez, Javier.

Director: Norverto Moriñigo, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

1.- Introducción:

Actualmente las empresas automovilísticas tienen como objetivo fundamental lograr un bajo consumo de combustible en todos sus vehículos. Uno de los principales factores a tener en cuenta es el coeficiente aerodinámico del vehículo en cuestión.

El coeficiente aerodinámico puede ser definido como número adimensional que nos permite el estudio aerodinámico de un vehículo. En el caso de coches de calle el coeficiente aerodinámico que presenta más interés es el coeficiente de arrastre (drag o C_D), que es la magnitud adimensional que cuantifica la resistencia de un objeto en un medio fluido.

Este coeficiente de arrastre puede ser calculado siguiendo la siguiente ecuación (Ec1.1):

$$C_d = \frac{2 \text{ Fuerza Arrastre}}{\rho v^2 A}$$

Ec1.1

Donde la velocidad, v , y área, A , son valores constantes pero por otro lado la densidad, ρ , y la fuerza de arrastre, son valores que dependen en cierta medida de la temperatura y además son difícilmente calculables. Es por este motivo que se plantea modificar la temperatura del vehículo a estudiar para comprender la inferencia de la temperatura en el coeficiente de arrastre, determinando el tipo de relación existente.

Si se demuestra que existe algún tipo de relación entre coeficiente de arrastre y temperatura se estudiará la viabilidad de algún método para alterar la temperatura superficial de un vehículo, logrando una mejora en el consumo de combustible.

Para simular diferentes temperaturas se utilizará un software CFD (Dinámica de fluidos computacional), en este caso la herramienta de ANSYS, Fluent, que nos permite calcular fácilmente coeficientes de arrastre.

En cuanto al estado de la técnica, la relación entre coeficiente de arrastre y temperatura sí que ha sido estudiada, pero no en gran medida. Según diferentes estudios sí que existe una relación positiva entre estos dos términos. Algunos de los más significativos son:

‘Experimental and computational ice shapes and resulting drag increase for a NACA 0012 airfoil’ por Jaiwon Shin y Thomas H. Bond, y ‘Establishing Temperature Dependency of the Aerodynamic Drag using CFD and Experimental Analysis’ por Ajinkya Krishnakumar, Parth Sharma, Yash Tambi y B. Ashok.

2.- Metodología

Se seguirán en Fluent los siguientes pasos: geometría, mallado, configuración y solución.

2.1 Geometría:

-En cuanto a la geometría se importara un vehículo ya optimizado para su estudio en CFD. En este paso también se definirá un volumen de control en el que se realizará la simulación y con el que se definirá el sentido del flujo.

2.2 Mallado:

-Se genera una malla para todo el volumen. En este paso se generan teselas en las que se capturan diferentes aspectos como gradientes de temperatura, presión y velocidad.

2.3 Configuración:

-Se marca el tipo de procesado y la precisión requerida.

2.4 Solución:

-Se eligen los modelos para resolver las ecuaciones. En este caso el modelo K-Epsilon y el de la energía.

-Como materiales utilizaremos aire como fluido y aluminio como solido.

-En cuanto a condiciones de contorno se define un flujo de aire incidente al vehículo y a velocidad constante de 33m/s (120Km/h, límite en carretera).

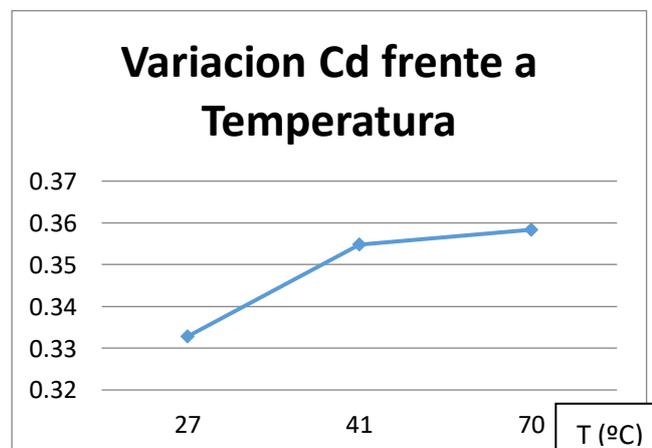
-La temperatura ambiente es de 23°C y las simulaciones se harán con temperaturas en la carrocería de 27°C, 41°C y 70°C

3.5 Resultados

-Para resolver el sistema de ecuaciones se utiliza un algoritmo iterativo que para cuando la solución (velocidad, presión...) apenas varia o los residuos son pequeños.

3.- Resultados

Tras realizar todas las simulaciones obtenemos la siguiente grafica (Grafica 3.1) relacionando coeficiente de arrastre (C_D) y temperatura:



Grafica 3.1

4.- Conclusiones y soluciones

Podemos concluir que existe una relación positiva entre coeficiente de arrastre y temperatura. Por este motivo en la ecuación 1.1 según disminuye la densidad del aire con la temperatura la fuerza de arrastre también disminuye, pero más lentamente, dando lugar a un aumento en el coeficiente de arrastre.

Como la relación es positiva, si queremos que el C_D disminuya para tener un consumo menor tenemos que enfriar la carrocería. El método planteado es usar el compresor del aire acondicionado y plantear un balance de potencias entre el aumento de potencia requerido por el aire acondicionado y la bajada de demanda en el motor por tener un mejor coeficiente de arrastre.

4.1 Mejora de potencia en el motor

Calculamos la diferencia de potencia, gracias a un documento Excel de potencias y consumo específico de un motor, entre los coeficientes de arrastre a 27°C, 41°C y 70°C. Obteniendo la siguiente tabla (Tabla 4.1.1):

ΔT	P(KW)
De 70°C a 27°C	1,58
De 41°C a 27°C	1,36

Tabla 4.1.1

4.2 Consumo de potencia por el aire acondicionado

Usando la ecuación de transferencia de calor modelada por la ley de enfriamiento de newton (Ec 4.2.1), planteamos una tabla con la potencia requerida para enfriar el capó del coche en un rango de temperaturas (Tabla 4.2.2).

$$dQ = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{inf})$$

Ec. 4.2.2

$h(W/(m^2 K^\circ))$	$A(m^2)$	ΔT	ΔT	P(KW)
72,78	2	De 70°C a 27°C	43	6,259
74,34	2	De 41°C a 27°C	14	2,081

Tabla 4.2.1

Comparando las Tablas 4.1.1 y 4.2.2 comprobamos como la potencia requerida por el aire acondicionado es en ambos casos mayor a la mejora de potencia obtenida por haber mejorado el coeficiente de arrastre. Por lo que concluimos que no resulta viable usar el aire acondicionado del vehículo para mejorar el C_D .

Finalmente se calcula en una tabla (Tabla 4.1) el aumento de consumo en g/h si se pretendiese utilizar el aire acondicionado como método de bajada de la temperatura de la carrocería del coche.

	Potencia aire (KW)	Consumo especifico(g/kw*h)	Aumento Consumo (g/h)
De 70°C a 27°C	6,25908	215	1345,7022
De 41°C a 27°C	2,08102	215	447,4193
	Consumo a 70-41°C (g/h)	Consumo a 27°C (g/h)	Disminución consumo(g/h)
De 70°C a 27°C	6051,87	5712,3	339,57
De 41°C a 27°C	6004,49	5712,3	292,19

Tabla 4.1

Quedando justificado la inviabilidad del uso del aire acondicionado al ser el aumento en el consumo mayor que su disminución por la mejora en coeficiente de arrastre.

5.- Bibliografía

Ver: Capitulo 6.-Bibliografia

FEASIBILITY STUDY ON THE OPTIMISATION OF THE AERODYNAMIC COEFFICIENT OF A VEHICLE BY CONTROLLING THE TEMPERATURE OF ITS SURFACES

Author: Puente Sánchez, Javier.

Director: Norverto Moriñigo, Juan.

Collaborating Entity: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

PROJECT BRIEF

1.- Introduction:

Nowadays, the main objective of automobile companies is to achieve low fuel consumption in all their vehicles. One of the main factors to take into account is the aerodynamic coefficient of the vehicle in question.

The aerodynamic coefficient can be defined as a dimensionless magnitude that allows the aerodynamic study of a vehicle. In the case of street cars, the aerodynamic coefficient of most interest is the drag coefficient (CD), which is the dimensionless quantity that quantifies the resistance to movement of an object in a fluid medium.

This drag coefficient can be calculated using the following equation (Ec1.1):

$$C_d = \frac{2 \frac{\text{Fuerza Arrastre}}{A}}{\rho v^2}$$

Ec1.1

Where the velocity, v , and area, A , are constant values but on the other hand the density, ρ , and the drag force, are values that depend to some extent on the temperature and are very difficult to calculate. Due to this we propose to modify the temperature of the vehicle to study in order to understand the inference of temperature in the drag coefficient, determining the type of existing relationship.

If it is demonstrated that some type of relationship exists between drag coefficient and temperature, the viability of some method to alter the surface temperature of a vehicle will be studied, in order to achieve an improvement in fuel consumption.

To simulate different temperatures a CFD software will be used, in this case the ANSYS tool, Fluent, which allows us to easily calculate drag coefficients.

As for the state of the art, the relationship between drag coefficient and temperature has been studied, but not to a great extent. According to different studies, there is a positive relationship between these two terms. Some of the most significant are:

Experimental and computational ice shapes and resulting drag increase for a NACA 0012 airfoil' by Jaiwon Shin and Thomas H. Bond, and 'Establishing Temperature Dependency of the Aerodynamic Drag using CFD and Experimental Analysis' by Ajinkya Krishnakumar, Parth Sharma, Yash Tambi and B. Ashok.

2.- Methodology

The following steps will be followed in fluent: geometry, meshing, configuration and solution.

2.1 Geometry:

-An already optimised vehicle will be imported for study in CFD. In this step a control volume will also be defined in which the simulation will be carried out and with which the direction of the flow will be defined.

2.2 Meshing:

-A mesh is generated for the entire volume. In this step, tesseræ are generated in which different aspects such as temperature, pressure and speed gradients are captured.

2.3 Configuration:

-The type of processing and the required precision are marked.

2.4 Solution:

-Models are chosen to solve the equations. In this case the K--Epsilon model and the energy model.

-Materials used are air as a fluid and aluminium as a solid.

-As far as contour conditions are concerned, an incident air flow to the vehicle is defined at a constant speed of 33m/s (120Km/h, road limit).

-The ambient temperature is 23°C and the simulations will be made with body temperatures of 27°C, 41°C and 70°C.

3.5 Results

-To solve the system of equations an iterative algorithm is used that stops when the solution (speed, pressure...) hardly varies or the residues are small.

3.- Results

After performing all the simulations we obtain the following graph (Graph 3.1) relating drag coefficient (CD) and temperature:

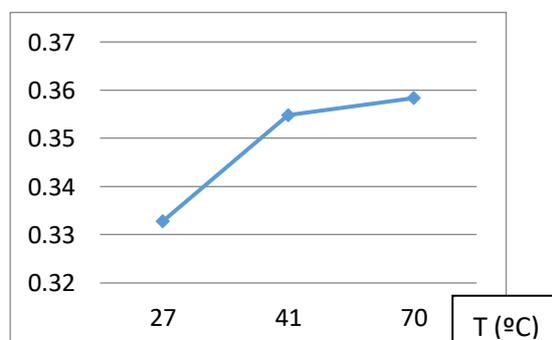


Figure 3.1

4.-Conclusions and solutions

We can conclude that there is a positive relationship between drag coefficient and temperature. For this reason in equation 1.1 as the air density decreases with temperature the drag force also decreases, but more slowly, leading to an increase in the drag coefficient.

As the relationship is positive, if we want the CD in order to decrease to have a lower consumption the body must be cooled down. The proposed method is to use the compressor of the air conditioning and raise a balance of power between the increase in power required by the air conditioning and the drop in demand in the engine to have a better drag coefficient.

4.1 Improved engine power

We calculate the power difference, thanks to a power document and specific consumption of an engine, between the drag coefficients at 27 ° C, 41 ° C and 70 ° C. Obtaining the following table (Table 4.1.1):

ΔT	P(KW)
De 70°C a 27°C	1,58
De 41°C a 27°C	1,36

Table 4.1.1

4.2 Air conditioning power consumption

Using the heat transfer equation modeled by the newton cooling law (Eq 4.2.1), we propose a table with the power required to cool the hood of the car in a temperature range (Table 4.2.2).

$$dQ = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{inf})$$

Ec. 4.2.2

$h(W/(m^2 K^\circ))$	$A(m^2)$	ΔT	ΔT	P(KW)
72,78	2	De 70°C a 27°C	43	6,259
74,34	2	De 41°C a 27°C	14	2,081

Table 4.2.1

Comparing Tables 4.1.1 and 4.2.2 we see how the power required by the air conditioning is in both cases greater than the power improvement obtained by having improved the drag coefficient. Therefore, we conclude that it is not feasible to use the vehicle's air conditioning to improve the CD.

Finally, the increase in consumption in g/h is calculated in a table (Table 4.1) if the intention is to use air conditioning as a method of lowering the temperature of the car body.

	Required power (KW)	Specific consumption (g/kw*h)	Increased consumption (g/h)
De 70°C a 27°C	6,25908	215	1345,7022
De 41°C a 27°C	2,08102	215	447,4193
	Consumption at 70- 41°C (g/h)	Consumption at 27°C (g/h)	Decreased consumption (g/h)
De 70°C a 27°C	6051,87	5712,3	339,57
De 41°C a 27°C	6004,49	5712,3	292,19

Table 4.1

The unfeasibility of the use of air conditioning is justified since the increase in consumption is greater than its decrease due to the improvement in drag coefficient.

5.- Bibliography

See: Chapter 6.-Bibliography

Índice:

Capítulo 1.- Introducción

- 1.1- Planteamiento del problema y objetivos
- 1.2- Introducción a la mecánica de fluidos
- 1.3- Introducción a coeficientes aerodinámicos
- 1.4- Introducción al coeficiente de arrastre
- 1.5- Introducción a Fluent
 - 1.5-1. Modelo K-Epsilon

Capítulo 2.- Descripción de las tecnologías (estado de la técnica)

Capítulo 3.- Descripción del modelo desarrollado

- 3.1.- Geometría
- 3.2.- Mallado
- 3.3.- Configuración en fluent
- 3.4.- Solución
- 3.5.- Resultados
- 3.6.- Implantación en Fluent

Capítulo 4.- Análisis de resultados y conclusión

Capítulo 5.- Soluciones a implementar

- 5.1.-Uso del aire acondicionado
- 5.2.-Conclusiones

Capítulo 6.- Bibliografía

Capítulo 1.- Introducción y planteamiento del proyecto

1.1 Planteamiento del problema y objetivos

Una de las principales preocupaciones de los fabricantes de coches es el consumo del vehículo. Este consumo depende de muchos factores pero uno de los principales y sobre el que se puede tener mucha incidencia es el coeficiente aerodinámico del vehículo.

La principal forma de modificar el coeficiente es con unas líneas más aerodinámicas, pero existen otros factores que podrían modificarlo como es el caso de la temperatura, factor que no se tiene en cuenta y que apenas se ha estudiado.

Este proyecto de fin de carrera está enfocado a demostrar cómo es capaz de influir la temperatura superficial de un vehículo en su coeficiente aerodinámico y estudiar la viabilidad de usar algún mecanismo que nos permita alterar la temperatura y por lo tanto, el coeficiente aerodinámico.

En el caso de que se pueda modificar el coeficiente aerodinámico se plantea utilizar el propio calor disipado en el motor de combustión interna para aumentar a la temperatura superficial del vehículo.

Si no es posible utilizar el calor residual se planteará un método de refrigeración y su viabilidad.

Los principales objetivos del proyecto son:

- Obtener una relación clara entre coeficiente de arrastre y temperatura
- Simular en Fluent un vehículo con diferentes temperaturas en la carrocería.
- Comprender el cálculo del coeficiente de arrastre para poder relacionarlo con la temperatura superficial.
- En el caso de que exista una relación entre coeficiente de arrastre y temperatura, estudiar la viabilidad de usar algún método para mejorar este coeficiente.

1.2 Introducción a la mecánica de fluidos

En la mecánica de fluidos existen 3 ecuaciones con las que podemos estudiar el comportamiento de un fluido. Estas ecuaciones son: la ecuación de continuidad, la ecuación de la cantidad de movimiento y la ecuación de la conservación de la energía.

Estas 3 ecuaciones se pueden generalizar gracias al teorema de transporte de Reynolds y el teorema de la divergencia de Gauss.

-Teorema de transporte de Reynolds

$$\frac{DH}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V \rho \eta dV \right) + \int_s \vec{U} \rho \eta \hat{n} dS$$

Ec.1.2.1

La ecuación 1.2.1 conocida como la ecuación del transporte de Reynolds es una expresión que relaciona integrales y derivadas, con gran interés en la mecánica de fluidos, ya que permite cambiar de un enfoque de sistema a un enfoque de volumen de control.

-Ecuación de continuidad:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega = - \int_{\partial\Omega} \rho(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) d(\partial\Omega)$$

Ec.1.2.2

-Ecuación de la cantidad de movimiento

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \mathbf{v} d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho \mathbf{v}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) d\partial\Omega = \int_{\partial\Omega} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} d\partial\Omega + \int_{\Omega} \rho \mathbf{f} d\Omega$$

Ec.1.2.3

-Ecuación de la conservación de la energía.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) d\Omega + \int_{\partial\Omega} \rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} d\partial\Omega = \int_{\partial\Omega} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v} d\partial\Omega + \int_{\Omega} \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} d\Omega - \int_{\partial\Omega} \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} d\partial\Omega$$

Ec.1.2.4

Las ecuaciones 1.2.2, 1.2.3 y 1.2.4 son extendidas al volumen de control gracias al ya mencionado teorema de transporte de Reynolds (Ec.1.2.1) y en su forma diferencial son las denominadas ecuaciones de Navier-Stokes.

1.3 Introducción a coeficientes aerodinámicos:

Se denomina coeficiente aerodinámico al número adimensional que nos permite el estudio aerodinámico de un vehículo.

El coeficiente aerodinámico de un vehículo se puede descomponer en 3 según las diferentes direcciones en el espacio. Coeficiente de arrastre, coeficiente de sustentación y coeficiente de empuje lateral aerodinámico.

Tanto el coeficiente de sustentación como el de empuje lateral no son tenidos especialmente en cuenta en el mundo de la automoción. Estos coeficientes son los que determinan la capacidad de un vehículo de mantenerse pegado al suelo en curva y no se salga de ella pero a velocidades no tan altas pierden importancia..

Por tanto se estudiará el coeficiente de arrastre porque es el que permite entre otras muchas cosas obtener un consumo reducido de combustible, siendo este hecho uno de los principales factores a tener en cuenta por las empresas automovilísticas.

Podemos definir el coeficiente de arrastre como:

“cantidad adimensional que se usa para cuantificar la resistencia de un objeto en un medio fluido”

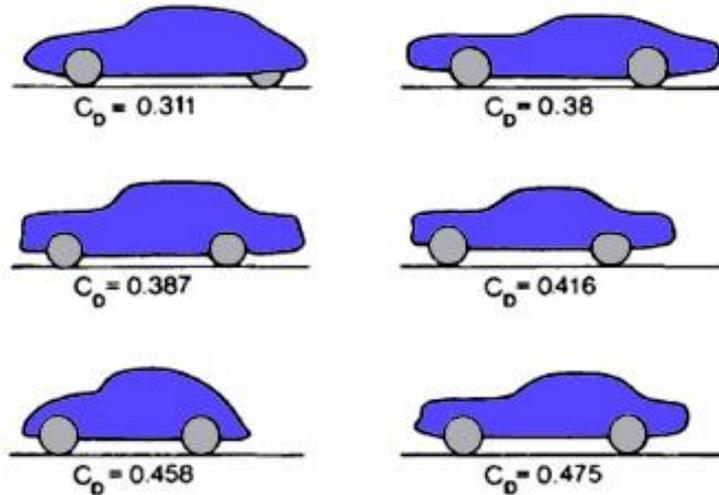


Figura 1.3.1: Coeficientes de arrastre en diferentes vehículos

En la figura 1 podemos observar como este coeficiente se modifica sustancialmente según la forma del vehículo.

Los primeros fabricantes en implementar formas aerodinámicas fueron Norteamericanos, con ejemplos tan significativos como el Chrysler Airflow(1936) (figura 1.3.2) y el Lincoln Zephyr(1936) con coeficientes de arrastre de 0,5 y 0,45 respectivamente. En la actualidad existen ejemplos con Coeficientes de arrastre tan bajos como el Volkswagen XL1 con un coeficiente de arrastre de 0,187



Figura 1.3.2 Chrysler Airflow

1.4 Introducción al coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre, C_D , es difícil de determinar ya que depende de diferentes factores, como la localización del punto de transición de flujo laminar a turbulento. Es por eso que su estudio y análisis se realiza en túneles de viento con prototipos a escala. El C_D es adimensional y puede ser calculado según la siguiente fórmula:

$$C_d = \frac{2 \frac{\text{Fuerza Arrastre}}{A}}{\rho v^2}$$

Ec. 1.4.1

Como se observa en la ecuación 1.4.1 el C_D depende de la densidad del fluido. En el problema planteado la densidad del fluido se distribuirá siguiendo un gradiente ya que las partículas de aire más próximas a la superficie del vehículo tendrán una mayor temperatura y por lo tanto una menor densidad. Esto podría implicar que C_D sea mayor siguiendo la ecuación 1.4.1.

Por otro lado consideraremos la velocidad del vehículo y su área constantes. La velocidad V utilizada será la indicada a la hora de realizar las simulaciones y A es el área frontal proyectada del vehículo.

Finalmente la fuerza de arrastre es la 'componente de la fuerza en la dirección de la velocidad del flujo' y varía con la temperatura. Este hecho es muy interesante ya que según J. Y. Wong 'Un aumento de 38°C en la temperatura ambiente provocara una reducción del 14% en la resistencia aerodinámica'. Esta fuerza aerodinámica se ve afectada por otros factores que no tendremos en cuenta, como la altura, que también provoca un descenso de hasta el 17% según el mismo autor.

1.5 Introducción a Fluent

Definimos CFD como software utilizado en mecánica de fluidos que mediante análisis numérico nos permite resolver problemas que involucran flujos de fluidos una vez aplicadas las condiciones de contorno requeridas.

Fluent es un CFD que nos permite modelar estos flujos así como transferencias de calor y reacciones en un amplio abanico de aplicaciones.

A continuación definiremos la metodología que sigue Fluent:

-Primera etapa de pre-procesado:

- 1)-Se importa o se define la geometría a analizar usando un fichero CAD.
- 2)-El volumen ocupado por el fluido se discretiza en pequeñas celdas. A esto se le denomina mallado y sus elementos o celdas pueden ser 2D (triángulos o rectángulos) o 3D (distintos prismas). El uso del mallado es muy interesante ya que en cada celda se estudiarán las propiedades físicas del fluido a estudiar y su integración nos proporcionará un resultado final.

-En la etapa de mallado se busca obtener un buen compromiso entre velocidad y precisión. Una malla más fina, de menor tamaño, nos proporcionará una mejor precisión en los cálculos pero el tiempo de ejecución del software será mucho mayor.

3)- Se define el modelado físico. En fluent los modelos más usados son los de 2 ecuaciones, como el K-Epsilon o el K-Omega. Concretamente usaremos el modelo K-Epsilon, del que se hablará más adelante.

4)-Se definen las condiciones de contorno aplicadas tanto al fluido a analizar como a las superficies adyacentes.

-Segunda etapa, en la que se inicia la simulación y se resuelven las ecuaciones del modelo planteado de forma iterativa hasta llegar a una situación en la que la solución no varía con más iteraciones o los residuos han disminuido de forma considerable.

-Tercera y última etapa, se utiliza un programa de post-procesado para mostrar las soluciones obtenidas de forma grafica y numérica.

1.5.1 Modelo K-epsilon:

Es el modelo más usado para simular las características de flujo en condiciones de flujo turbulento. Consta de de 2 ecuaciones en derivadas parciales que dan una descripción de la turbulencia del fluido.

Las 2 variables en derivadas parciales son la energía cinética turbulenta (k) y el factor de disipación de energía turbulenta (ϵ)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon$$

Ec. 1.5.1

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

Ec.1.5.2

Donde las ecuaciones 1.5.1 y 1.5.2 tienen como significado que el factor de cambio de k o ϵ más el transporte de k o ϵ por convección es igual al transporte de k o ϵ por difusión más el ratio de producción de k o ϵ menos el ratio de destrucción de k o ϵ (Ec1.5.3).

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}}_{\text{Rate of increase}} + \underbrace{\text{div}(\rho\varepsilon\mathbf{U})}_{\text{Convective transport}} = \underbrace{\text{div}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon\right]}_{\text{Diffusive transport}} + \underbrace{C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij}}_{\text{Rate of production}} - \underbrace{C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}}_{\text{Rate of destruction}}$$

Ec.1.5.3 con comentarios acerca de cada uno de los términos.

Las principales ventajas de este modelo es que es muy sencillo y las soluciones convergen rápidamente y son razonables. La principal desventaja de este modelo es que solo funciona correctamente en flujos turbulentos y algunos de sus resultados son pobres como es el caso de remolinos y flujos rotativos.

Capítulo 2.- Descripción de las tecnologías (estado de la técnica)

Actualmente ningún vehículo tiene implementado un sistema para alterar su temperatura superficial con el fin de modificar su coeficiente de arrastre.

Los pocos estudios que hay al respecto son sobre configuraciones muy sencillas y en ellos se demuestra que un incremento de temperatura afecta negativamente al coeficiente de arrastre, aumentándolo.

Un estudio llamado ‘Experimental and computational ice shapes and resulting drag increase for a NACA 0012 airfoil’ llevado a cabo por **Jaiwon Shin** y **Thomas H. Bond**, ingenieros aeronáuticos en NASA, demostró para 2 diferentes velocidades que un aumento de temperatura en un perfil aerodinámico helado conlleva un aumento en el coeficiente de arrastre (Tablas 2.1 y Gráficos 2.1).

Table 2. Effect of Total Air Temperature on Drag Coefficient.

(a) Airspeed=150 mph, LWC=1.0g/m³, MVD=20µm

Total Temperature (°F)	Experimental Drag Coefficient	Calculated Drag Coefficient
28	0.0578	0.0346
25	0.0540	0.0372
22	0.0315	0.0392
18	0.0271	0.0351
12	0.0229	0.0217
1	0.0229	0.0209
-15	0.0233	0.0202

(b) Airspeed=230 mph, LWC=0.55g/m³, MVD=20µm

Total Temperature (°F)	Experimental Drag Coefficient	Calculated Drag Coefficient
28	0.0428	0.0470
25	0.0371	0.0294
22	0.0311	0.0202
18	0.0268	0.0195
12	0.0255	0.0195
1	0.0234	0.0195
-15	0.0218	0.0192

Tablas 2.1 Comparación entre temperatura total en °F y Coeficiente de arrastre

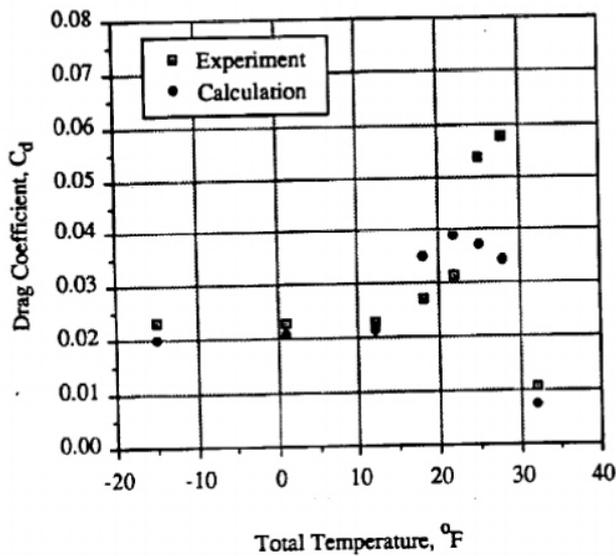


Fig.10. Effect of Total Temperature on Drag ($V_{\infty}=150$ mph).

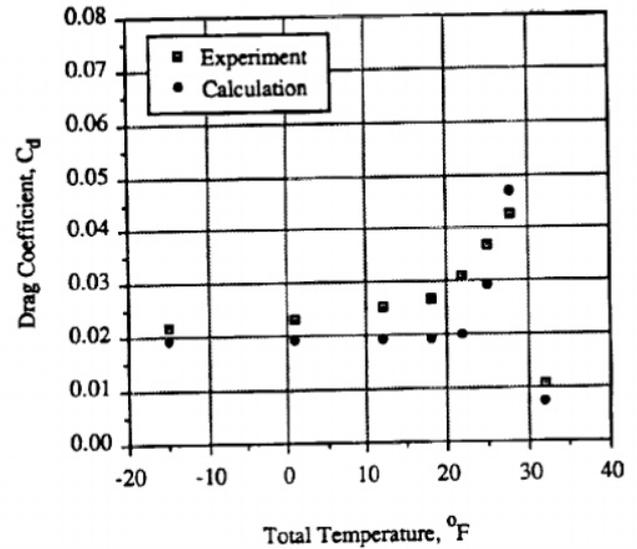
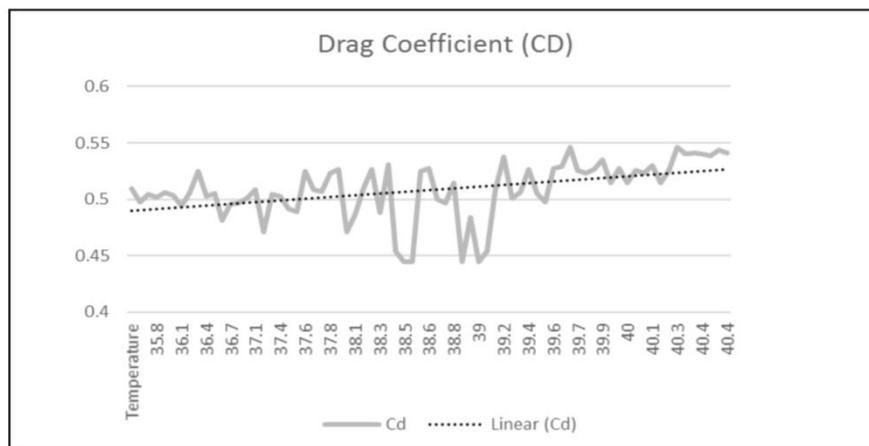


Fig.11. Effect of Total Temperature on Drag ($V_{\infty}=230$ mph).

Gráficos 2.1 Comparación entre temperatura total en °F y Coeficiente de arrastre

-Como se ha comentado anteriormente según J.Y.Bond, profesor e investigador en el departamento de mecánica y de ingeniería aeronáutica en la universidad de Carleton, un aumento en la temperatura de 38°C provoca una reducción del 14% de la resistencia aerodinámica. Si la densidad del aire variase más de un 14% al pasar de 0°C a 38°C estaríamos en el caso de un aumento del coeficiente de arrastre.

-Otro estudio denominado 'Establishing Temperature Dependency of the Aerodynamic Drag using CFD and Experimental Analysis' también concluyó teórica y experimentalmente que existe una relación lineal entre coeficiente de arrastre y temperatura (Grafica 2.2)



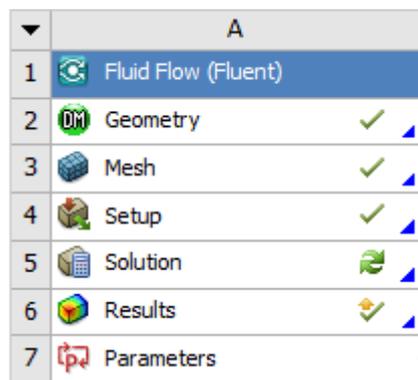
Grafica 2.2 Comparación entre Drag Coefficient (coeficiente de arrastre) y temperatura

Capítulo 3.- Descripción del modelo desarrollado y procedimiento de simulación.

Para el cálculo de los diferentes coeficientes de arrastre existen diferentes alternativas. Entre las alternativas de software CFD más utilizadas actualmente se encuentran ANSYS y Openfoam como principales referentes.

En este TFG se utilizara ANSYS y concretamente su herramienta de simulación de flujo de fluidos; Fluent.

Al iniciar el programa al que pertenece Fluent, ANSYS, tendremos que seleccionar la herramienta a utilizar, en este caso Fluid Flow (fluent). Posteriormente nos muestra diferentes pasos a completar que son los que se comentaran posteriormente: geometría, mallado, configuración, solución y resultados (Grafica 3.1.1)



Grafica 3.1.1 Menú de fluent

3.1.-Geometria:

Se puede crear una geometría desde cero o importarla. En este caso se importará un vehículo de libre uso optimizado para CFD ya que su diseño es suficientemente simple para realizar simulaciones rápidas y además no presenta una geometría compleja (Imagen 3.1.2)

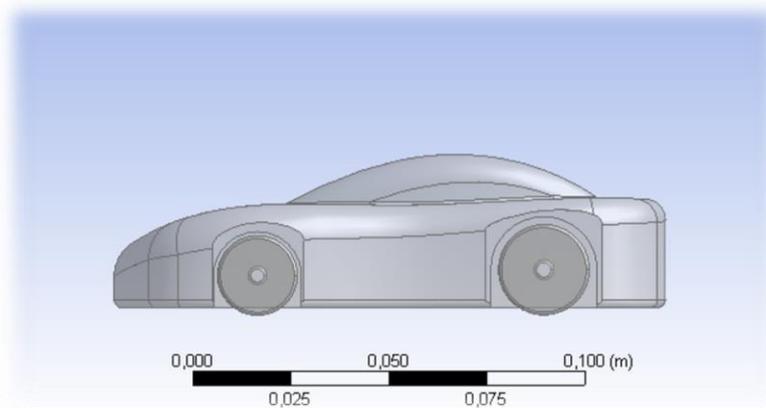


Imagen 3.1.2 Vehículo a simular

-Una vez importada la geometría se procede a crear un volumen de control o recinto donde se realizará la simulación (Imagen 3.1.3). De este recinto es importante nombrar su contorno (paredes) para posteriormente definir el sentido del flujo de aire incidente.

-Definiremos una pared de entrada, una de salida y cuatro paredes laterales cerrando así el paralelepípedo. (Imagen 3.1.4)

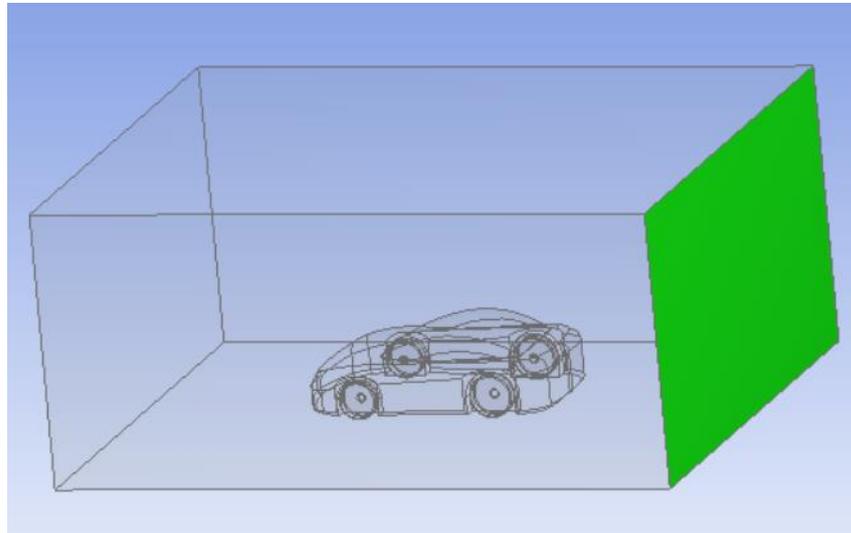


Imagen 3.1.3 Recinto de control con la salida (outlet) marcada en verde

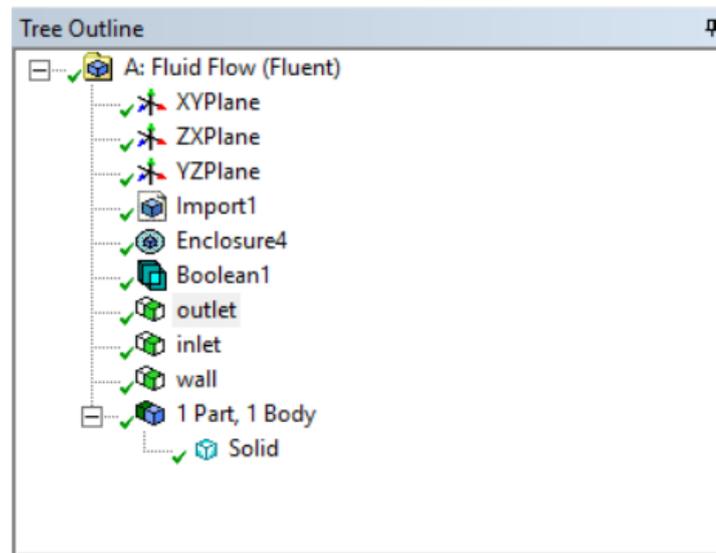


Imagen 3.1.4 Menú en el que aparece el recinto (enclosure), las caras de entrada (inlet), salida (outlet) y paredes laterales (walls)

3.2.-Mallado:

Una vez definida la geometría hay que generar una malla para todo el volumen.

El propósito del mallado es dividir la geométrica, resolver rasgos geométricos y capturar gradientes de velocidad, presión y/o temperatura.

Esta malla estará aplicada tanto al contorno del vehículo como al recinto de control y se generara de forma automática por ANSYS, eligiendo la forma y el tamaño de las celdas adecuadas. En esta simulación la forma será triangular para superficies 2D y tetraédrica para 3D. (Imagen 3.1.4)

La mínima calidad ortogonal es un buen indicador de la calidad del mallado y este valor debe estar entre 0 y 1, con un valor mínimo de 0,01. En esta simulación se obtuvo un valor de 0.151533 por lo que la calidad del mallado es suficientemente buena.

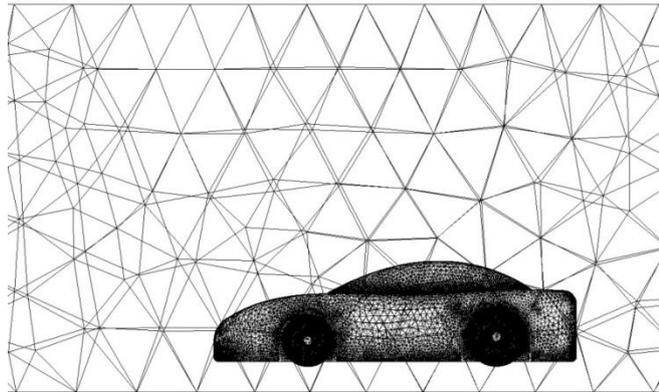


Imagen 3.2.1 Mallado triangular del volumen de control y del vehículo

3.3.- Configuración de Fluent:

En esta etapa se configurara el análisis en CFD usando fluent.

Una vez abierto elegiremos duplicar la precisión. También está presente la opción de procesado en serie o en paralelo. Al utilizar un único ordenador marcaremos la opción de serie.

El solucionador serie de Fluent gestiona la entrada y salida de archivos, el almacenamiento de datos y los cálculos de campo de flujo usando un único proceso de resolución en un solo ordenador. Existe una utilidad llamada cortex que gestiona la interfaz de usuario de Fluent y las funciones gráficas. (Imagen 3.1.5)

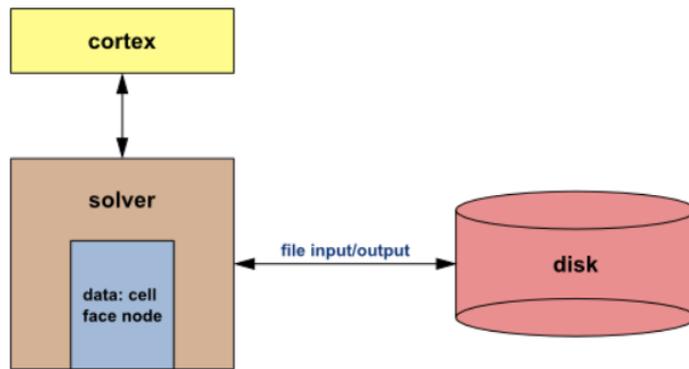


Imagen 3.3.1 Funcionamiento del solucionador serie de ANSYS

3.4. Solución:

Finalmente se abre la ventana de solución y se configuran desde un menú todos los parámetros del sistema a simular: modelo utilizado, materiales y condiciones de contorno.

3.4.1 Modelo:

-Se ha utilizado un modelo de tipo basado en presiones y en estado estacionario.

-En cuanto a los modelos utilizados han sido 2:

1- Modelo viscoso K-Epsilon del que se ha hablado anteriormente, que viene definido por 2 parámetros que varían y unas constantes definidas ya por fluent (Imagen 3.4.1)

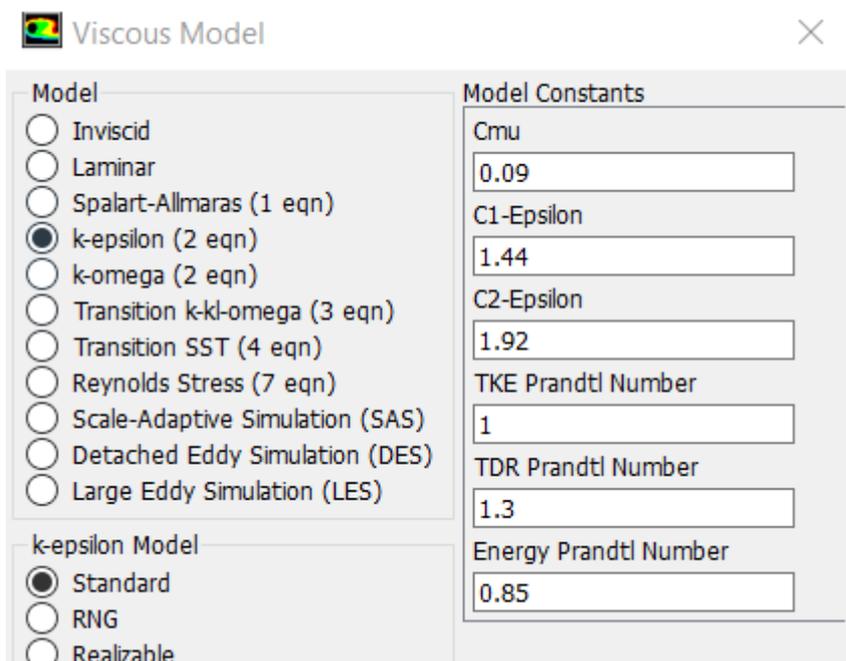


Imagen 3.4.1 Modelo K-Epsilon con los valores de las constantes

2.- Modelo de la energía, necesario para poder introducir los diferentes valores de temperatura a la superficie del vehículo. (Imagen 3.4.2)

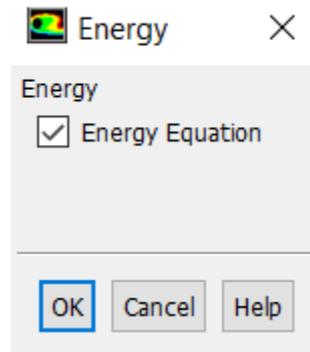


Imagen 3.4.2

3.4.2 Materiales:

-Los 2 materiales son aire como fluido y aluminio como solido, del que está hecha la carrocería del vehículo. Las propiedades de cada uno de los materiales son las mostradas a continuación y son las tomadas por defecto en fluent (imagen 3.4.3 e imagen 3.4.4)

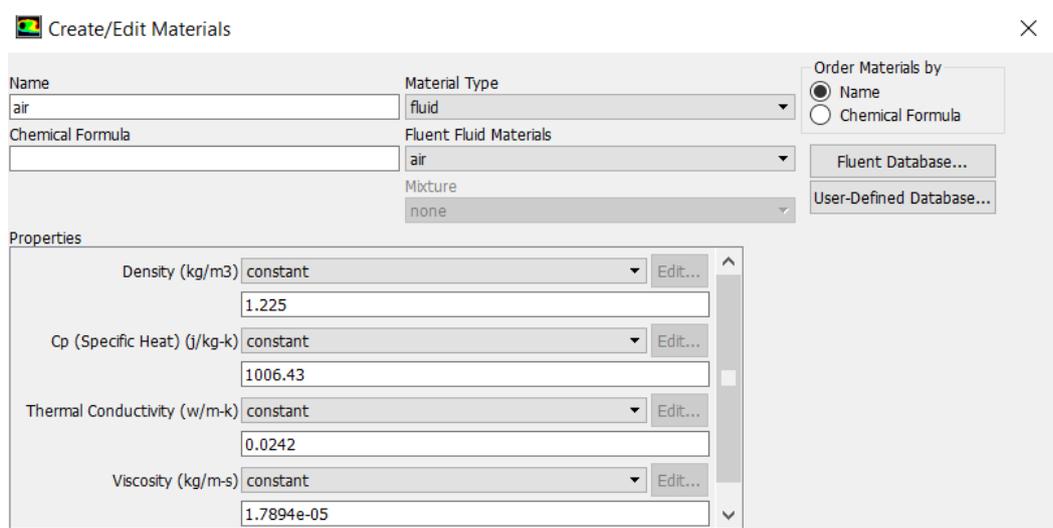


Imagen 3.4.3 propiedades del aire

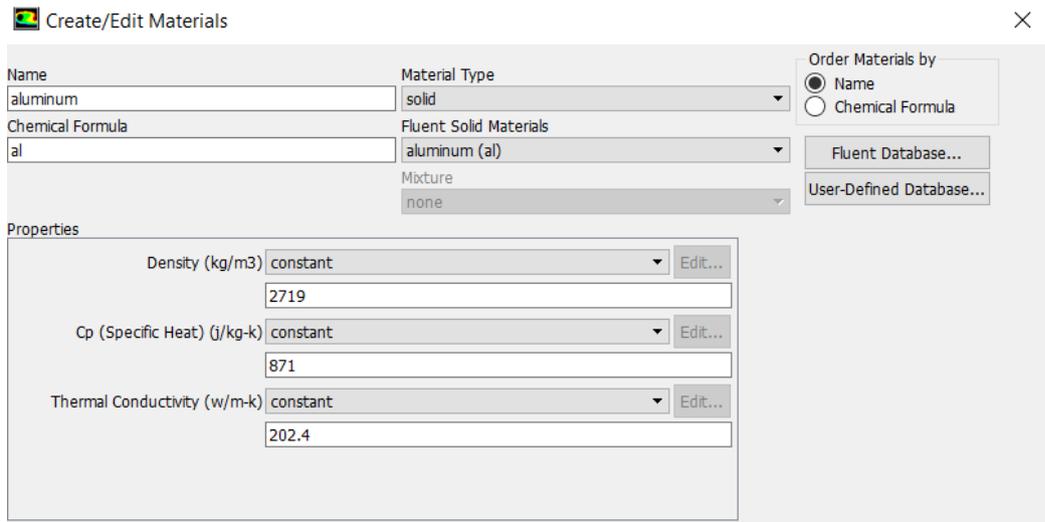


Imagen 3.4.4 propiedades del aluminio

3.4.3 Condiciones de contorno:

Las condiciones de contorno tienen que ser aplicadas a las zonas marcadas anteriormente en la geometría (Imagen 3.4.5):

-La pared de entrada (inlet) es la que definiremos como la pared en la que origina la corriente incidente. Se define de tipo velocidad.

-La pared de salida (outlet) es la salida del aire. Se define de tipo presión. (Imagen 3.4.6)

-El recinto restante será definido de tipo pared.

-La carrocería del vehículo es de tipo pared y será modificada únicamente para cambiar su temperatura.

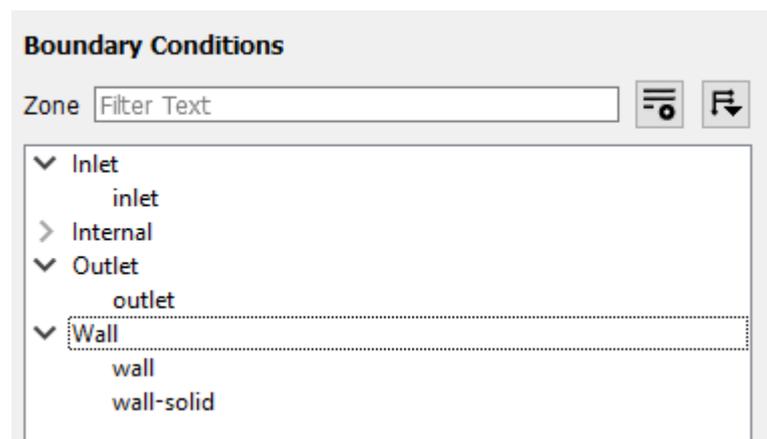


Imagen 3.4.5

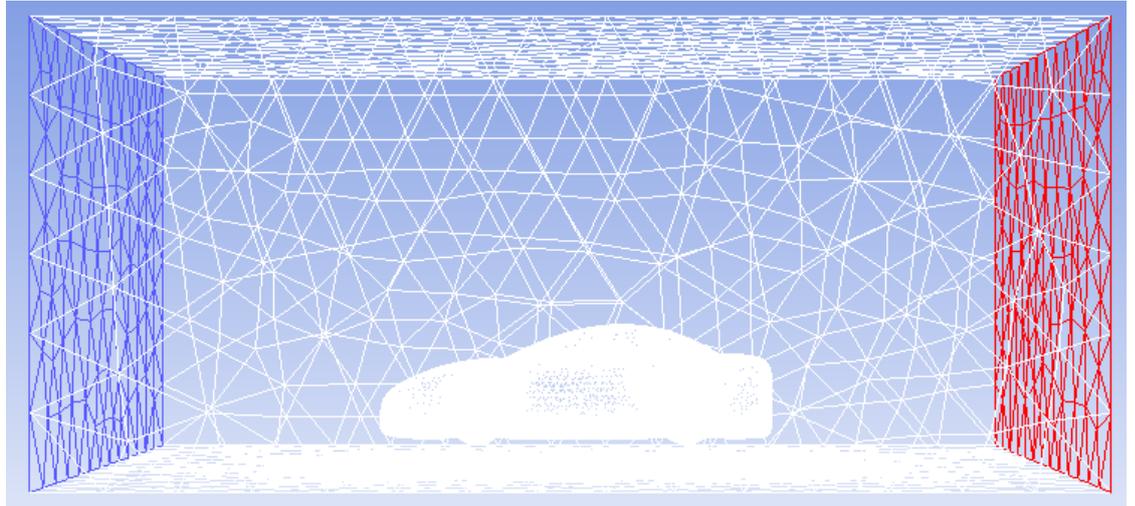


Imagen 3.4.6 Se muestra la entrada (inlet) en azul y la salida (outlet) en rojo además de todo el mallado del volumen de control.

3.4.5 Resolución del modelo:

El método de resolución del problema está basado en un algoritmo en el que las ecuaciones se resuelven en bucle de forma iterativa ya que son no lineales y están acopladas.

Cuando la solución converge al haber cambios muy pequeños en las sucesivas iteraciones o las propiedades de interés (Presión, velocidad...) alcanzan valores estacionarios el bucle se para y se obtiene el resultado final (Imagen 3.4.7).

Pressure-Based Segregated Algorithm

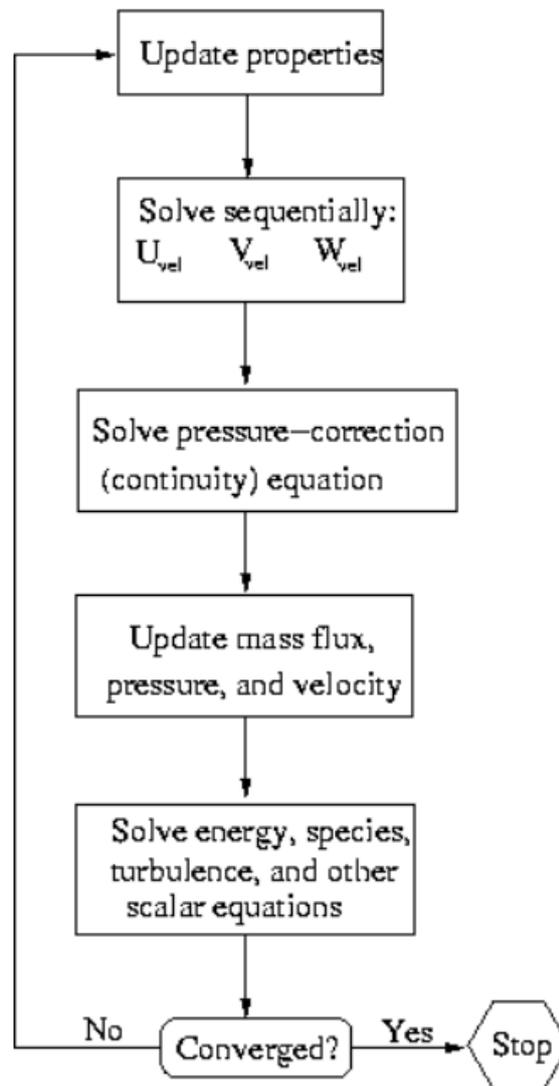


Imagen 3.4.7 Esquema del funcionamiento del algoritmo

El proceso mostrado en la imagen 3.4.7 sigue los siguientes pasos:

- 1.-Actualización de las propiedades del fluido
- 2.-Resolución de las ecuaciones de momentos
- 3.-Resolución de la ecuación de presión
- 4.-Corrección de la presión y velocidad en las caras
- 5.-Resolución de la ecuación de la energía
- 6.-Actualización de propiedades debidas a la interacción entre fases.
- 7.-Comprobar la convergencia de las ecuaciones.

Una vez que se obtiene una solución Fluent nos permite calcular todos los coeficientes aerodinámicos y sus respectivas fuerzas (imagen 3.4.8).

En el menú que se despliega se selecciona la pared en la que se quiere calcular el coeficiente de arrastre y el sentido de la fuerza de arrastre. Finalmente Fluent nos muestra el coeficiente en pantalla.

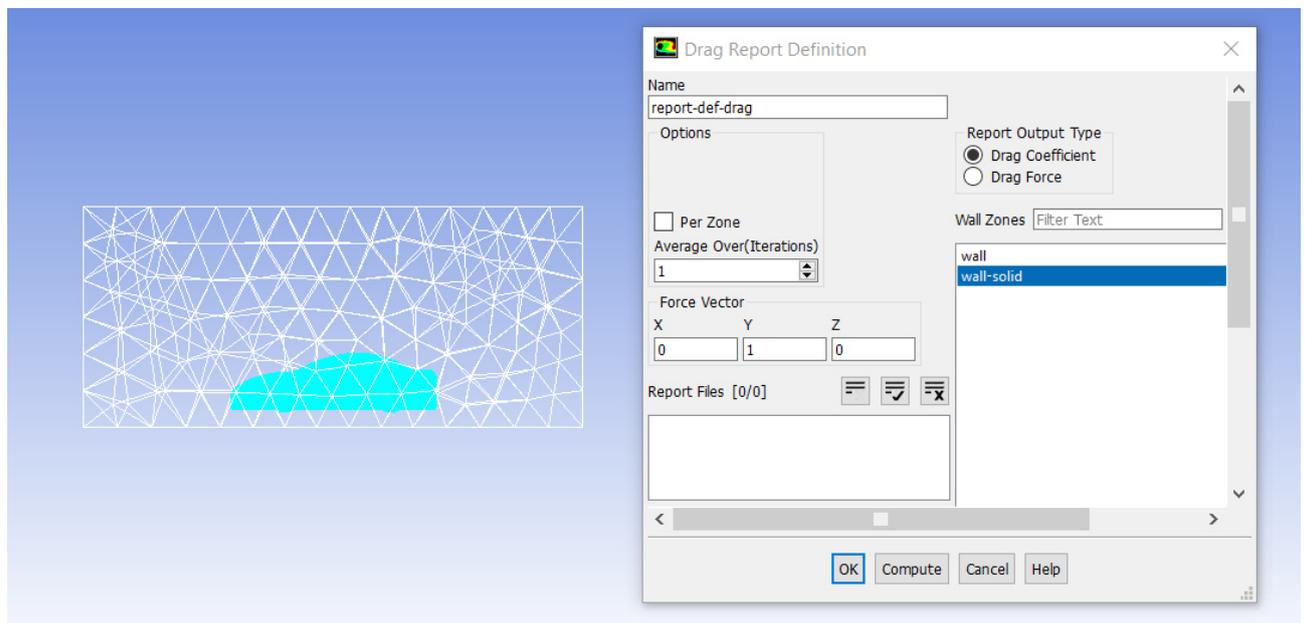


Imagen 3.4.8 Con las paredes del vehículo resaltadas

3.5 Implantación del problema en Fluent

- Queremos calcular coeficientes de arrastre para varias temperaturas por lo que se tomará como rango de temperaturas del vehículo 27-70°C. 70°C es una temperatura que puede alcanzar la carrocería tras un periodo de exposición al sol. Por este motivo las diferentes temperaturas que serán ensayadas se aplicaran a toda la superficie del vehículo.

-Se supondrá que el vehículo circula por una autovía, por lo que la velocidad será de 120 Km/h (33m/s).

-La temperatura ambiente se tomará a 23°C.

-A continuación se realizan las simulaciones:

1.-Primera simulación a 27°C. Fluent nos muestra el siguiente resultado (imagen 3.5.1):

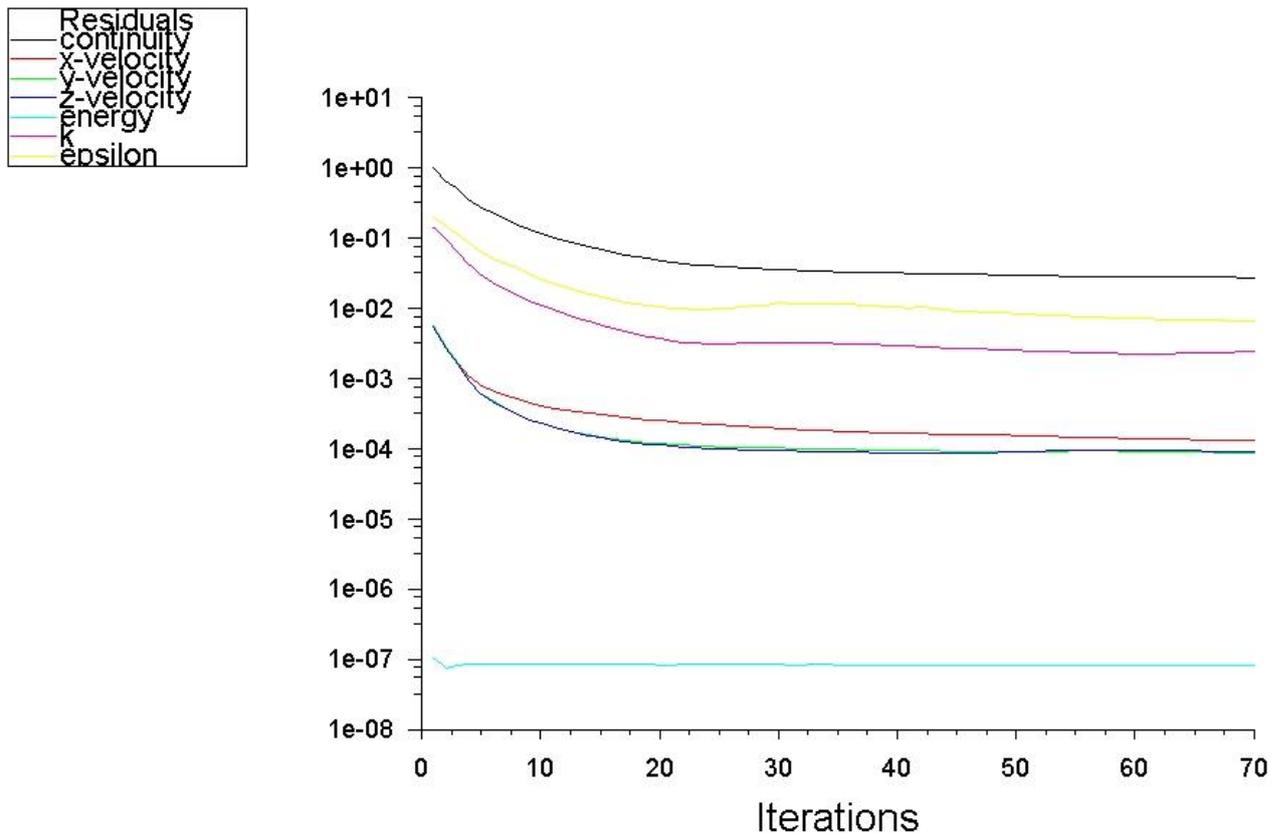


Imagen 3.5.1

Como se puede observar en la Imagen 3.6.1 en la iteración número 70 podemos considerar que la solución ya ha convergido al permanecer constantes todas las velocidades, la k y la ϵ del modelo planteado y la energía del sistema. De ahora en adelante para el resto de simulaciones 70 será el número de referencia para afirmar la convergencia de la solución.

Calculamos con Fluent el valor del coeficiente de arrastre y obtenemos el siguiente valor:

-Drag (27° F= (0, 1,0))

- $C_D = 0.3328076$

2.- Segunda simulación a 41°C:

Calculamos con Fluent el valor del coeficiente de arrastre y obtenemos el siguiente valor:

-Drag (41° F= (0, 1,0))

- $C_D = 0.35479224$

3.- Tercera simulación a 70°C (Imagen 3.5.2):

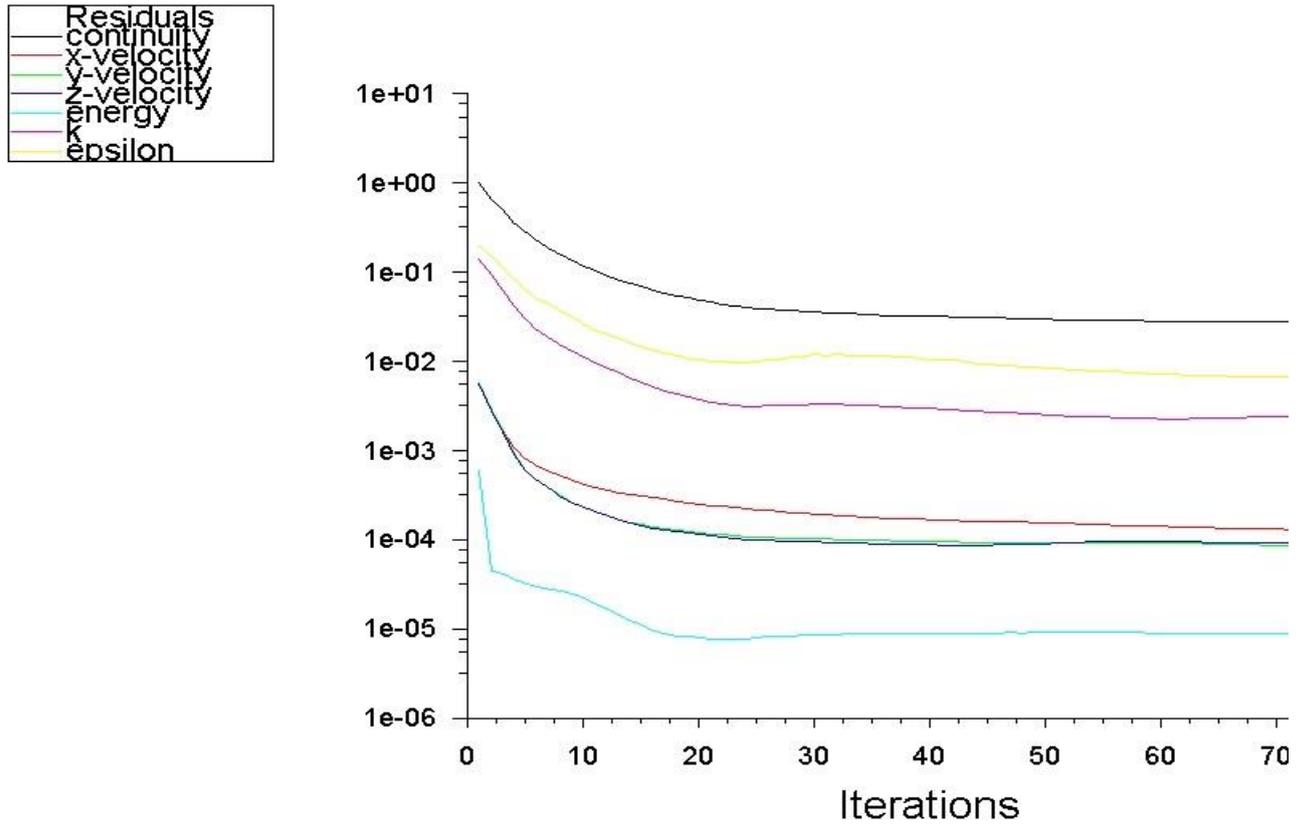


Imagen 3.5.2

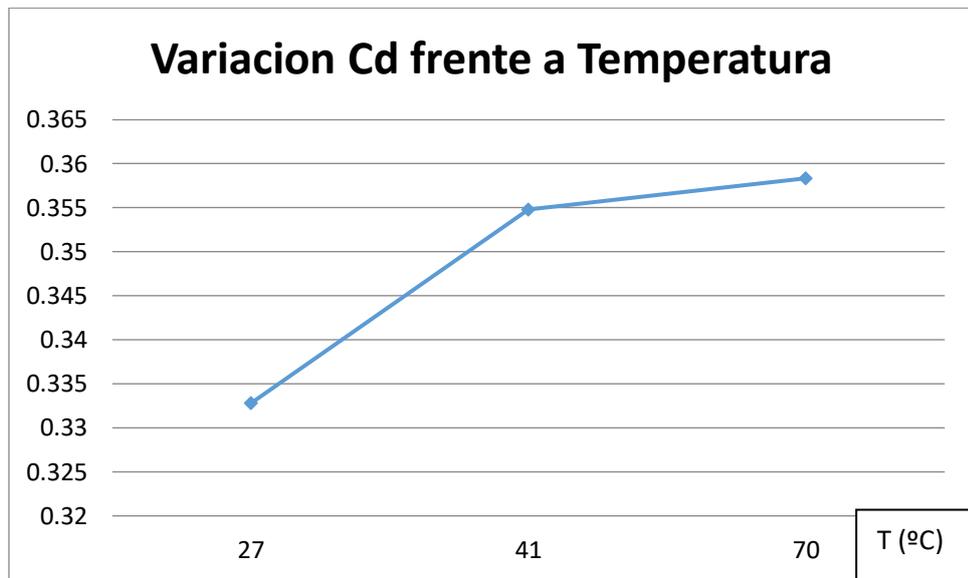
Al igual que los otros casos también se pudo volver a apreciar la estabilidad de los parámetros en la iteración número 70.

Calculamos con Fluent el valor del coeficiente de arrastre y obtenemos el siguiente valor:

-Drag (70 ° F= (0, 1,0))

-C_D = 0.35835639

A continuación se mostrara gráficamente la relación entre coeficiente de arrastre y temperatura (Grafica 3.5.1):



Grafica 3.5.1

3.6 Resultados:

Además de los resultados obtenidos en el apartado 3.5, Fluent también nos permite obtener resultados gráficos de cómo se distribuye la velocidad o presión en la superficie del vehículo. Aunque para el cálculo del coeficiente de arrastre no tiene gran relevancia se ha optado por tomar una imagen de la distribución de la velocidad del aire alrededor del contorno del vehículo. (Imagen 3.6)

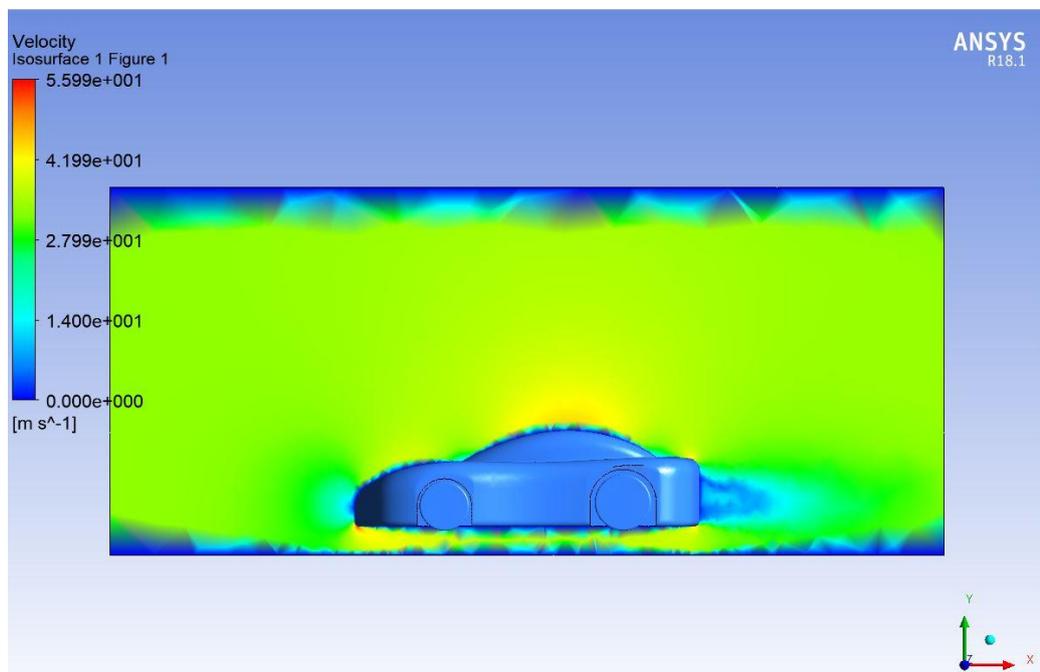


Imagen 3.6

Capitulo 4.- Análisis de resultados y conclusión

-Como se muestra en la grafica 3.5.1 existe una relación positiva entre C_D y temperatura. Según aumenta la temperatura la variación del coeficiente de arrastre es positiva pero cada vez menor.

-El sentido de esta grafica se puede entender gracias a la Ec. 1.4.1 mencionada al inicio, pudiendo afirmar que como el área proyectada del vehículo y la velocidad son constantes con la temperatura; según disminuye la densidad del aire con un aumento de temperatura, la fuerza de arrastre también disminuye pero en una proporción menor. Logrando el aumento en el coeficiente de arrastre demostrado en la simulaciones.

$$C_d = \frac{2 \frac{\text{Fuerza Arrastre}}{A}}{\rho v^2}$$

Ec. 1.4.1

-En el ejemplo mencionado por J. Y. Wong ('Un aumento de 38°C en la temperatura ambiente provocara una reducción del 14% en la resistencia aerodinámica') tras este experimento afirmamos que la densidad disminuye más en proporción que la Fuerza de arrastre (resistencia aerodinámica)

Capitulo 5.- Soluciones

A la hora de abordar soluciones se plantearon 2 escenarios posibles:

1. El coeficiente de arrastre disminuye con el aumento de la temperatura. La solución óptima sería utilizar el calor residual del motor de combustión interna para calentar la carrocería pero ya se ha demostrado que este caso no es posible.

2. El coeficiente de arrastre aumenta con la temperatura. Dos posibles soluciones son:

- 2.1 Utilizar un aislante entre el motor y la carrocería para lograr una menor temperatura pero se descarta esta opción porque el calor que genera el motor no es el principal motivo del calentamiento de la carrocería.

- 2.2 Usar el aire acondicionado del vehículo para lograr un descenso de la temperatura óptimo.

Nos decantaremos por estudiar la viabilidad de la solución 2.2 presentando a continuación un balance de potencias para determinar si usar el aire acondicionado resulta en un balance positivo en el consumo energético del vehículo.

5.1 Uso del aire acondicionado

1) Mejora de potencia en el motor:

Según Schenkel 'Para un camión de tamaño completo, un cambio en el coeficiente de arrastre de 0.01 es aproximadamente igual a una mejora en el ahorro de combustible de 0.1 mpg (0,00425 Km/L) en el ciclo de conducción combinado de ciudad/carrera'. Esto nos da una primera aproximación de la mejora en el consumo, que es bastante pequeña.

Para calcular la mejora de potencia tendremos que simular el régimen de funcionamiento de un motor y comparar la potencia con los distintos coeficientes de arrastre a 27°C a 41°C y a 70°C. También se calculará el consumo específico y el consumo en g/h para poder estimar una posible mejora en el consumo de combustible.

-Características de la simulación:

-Para este balance de potencias hay que tener en cuenta que si la velocidad del coche se duplica la potencia requerida se multiplica por ocho (imagen 5.1), por este motivo la velocidad lineal del coche será la más alta admisible en carretera, 33 m/s (120Km/h), logrando la mayor variación de potencia.

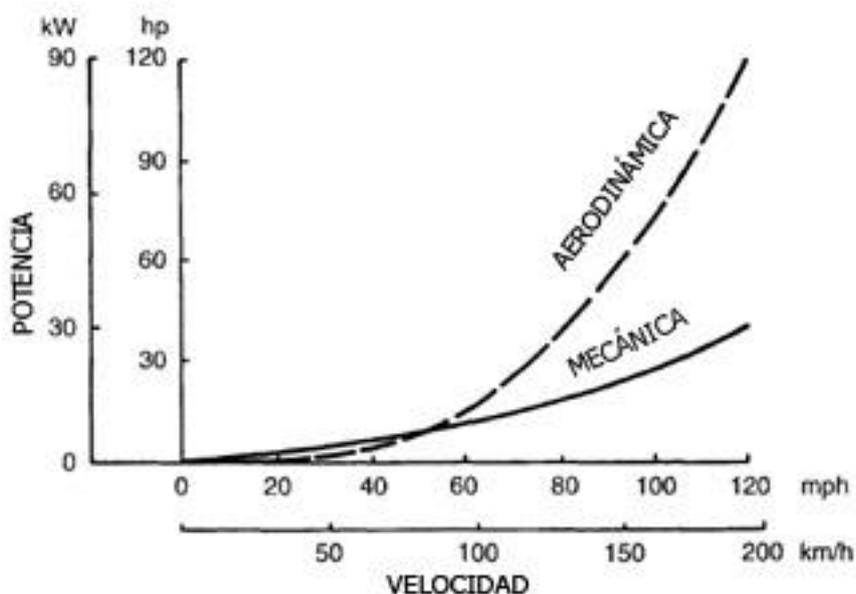


Imagen 5.1 relación entre velocidad y potencia

En la imagen 5.1 se aprecia que la potencia requerida para superar la resistencia aerodinámica es muy superior a la mecánica debida a la resistencia en las ruedas y la transmisión.

-Se usará una hoja Excel de consumos específicos de un motor Passat TDI 90 CV para calcular la potencia en el motor.

-Como vehículo se utiliza la maqueta usada en Fluent pero escalada, ya que sus dimensiones no corresponden a un coche de calle. La escala se toma relacionando la longitud de la maqueta, 14cm, con 4m, que es una longitud típica para un coche compacto, quedando la relación $R= 1:\frac{200}{7}$

-Una vez escalado el vehículo con la relación anterior R; queda un área frontal proyectada de $2,311077551m^2$.

-Finalmente como peso se tomará 1100 Kg, peso razonable para un vehículo compacto como el de la simulación.

El resto de datos del entorno, combustible y desarrollos de marchas son los siguientes:

DATOS DEL ENTORNO		
Pendiente	0	Grados
Densidad aire	1,3	kg/m ³
Coef. Rodadura	0,015	
g	9,81	m/s ²

DATOS PARA CÁLCULO CONSUMOS

Rendimiento Transmisión	0,9	
Poder calorífico combustib	43500	KJ/Kg
Densidad combustible	0,87	Kg/l

DESARROLLOS FINALES

1ª		Km/h 1000 rpm
2ª		Km/h 1000 rpm
3ª		Km/h 1000 rpm
4ª	35,1	Km/h 1000 rpm
5ª	46,6	Km/h 1000 rpm
6ª	67,6	Km/h 1000 rpm
7ª		Km/h 1000 rpm
8ª		Km/h 1000 rpm

El cálculo del consumo específico se realiza con una grafica (Grafica 5.1) en la que entrando con la velocidad en rpm del motor y la pme del motor en bar se selecciona la curva más cercana al punto obtenido. El consumo en g/h se muestra directamente en el documento Excel.

Fuel Consumption Map (g/kW-Hr)

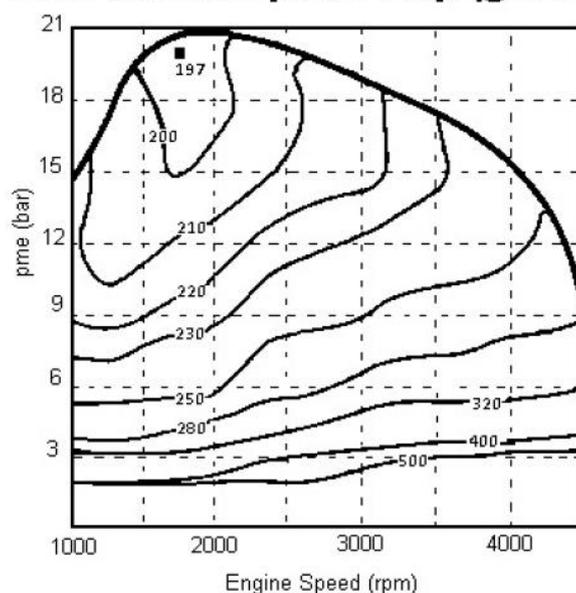


Fig. 66. Gráfica modificada

Grafica 5.1

A continuación realizamos las simulaciones para el cálculo de la potencia en el motor y el consumo específico con los coeficientes de arrastre a 27°C (0.3328076) a 41°C (0.35479224) y a 70°C (0.35835639):-

Caso 1: coeficiente de arrastre a 27°C (0.3328076)

Velocidad (Km/h)	SIMULACIÓN				En rueda		En Motor
					Potencia KW	Potencia CV	Potencia KW
10	161,87	3,86	0,00	165,72	0,46	0,63	0,51
20	161,87	15,43	0,00	177,30	0,98	1,34	1,09
60	161,87	138,87	0,00	300,74	5,01	6,81	5,57
110	161,87	466,77	0,00	628,63	19,21	26,10	21,34
120	161,87	555,49	0,00	717,36	23,91	32,49	26,57

Imagen 5.2 Potencia en motor a 27°C

El valor que interesa es la potencia en KW a 120 Km/h porque es la velocidad a la que se obtuvo el coeficiente de arrastre. Potencia en motor=26,57KW.

Entrando con la velocidad de giro de motor y su pme obtenemos los siguientes consumos específicos:

V (Km/h)	Consumos específicos medidos en gráfica				g/h kW			
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª
10,00								
20,00								
60,00								
110,00					320	260	220	
120,00					320	260	215	

Imagen 5.3 consumos específicos a 27°C

	Consumo g/h							
V (Km/h)	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª
10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
110,00	0,00	0,00	0,00	6829,60	5549,05	4695,35	0,00	0,00
120,00	0,00	0,00	0,00	8502,02	6907,89	5712,30	0,00	0,00

Imagen 5.4 consumo en g/h a 27°C

Caso 2: coeficiente de arrastre a 41°C (0.35479224)

Velocidad (Km/h)	SIMULACIÓN				En rueda		En Motor
					Potencia KW	Potencia CV	Potencia KW
10	161,87	4,11	0,00	165,98	0,46	0,63	0,51
20	161,87	16,45	0,00	178,31	0,99	1,35	1,10
60	161,87	148,05	0,00	309,91	5,17	7,02	5,74
110	161,87	497,60	0,00	659,47	20,15	27,38	22,39
120	161,87	592,19	0,00	754,05	25,14	34,15	27,93

Imagen 5.5 Potencia en motor a 41°C

El valor que interesa es la potencia en KW a 120 Km/h. Potencia en motor=27,93KW.

	Consumos específicos medidos en gráfica g/h kW							
V (Km/h)	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª
10,00								
20,00								
60,00								
110,00				320	260	220		
120,00				320	260	215		

Imagen 5.6 consumos específicos a 41°C

V (Km/h)	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª
10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
110,00	0,00	0,00	0,00	7164,58	5821,22	4925,65	0,00	0,00
120,00	0,00	0,00	0,00	8936,92	7261,25	6004,49	0,00	0,00

Imagen 5.7 consumo en g/h a 41°C

Caso 3: coeficiente de arrastre a 70°C (0.35835639)

Velocidad (Km/h)	SIMULACIÓN				En rueda		En Motor
					Potencia KW	Potencia CV	Potencia KW
10	161,87	4,15	0,00	166,02	0,46	0,63	0,51
20	161,87	16,61	0,00	178,48	0,99	1,35	1,10
60	161,87	149,53	0,00	311,40	5,19	7,05	5,77
110	161,87	502,60	0,00	664,47	20,30	27,59	22,56
120	161,87	598,14	0,00	760,00	25,33	34,42	28,15

Imagen 5.8 Potencia en motor a 70°C

El valor que interesa es la potencia a 120 Km/h. Potencia en motor=28,15KW.

V (Km/h)	Consumos específicos medidos en gráfica				g/h kW			
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª
10,00								
20,00								
60,00								
110,00					320	260	220	
120,00					320	260	215	

Imagen 5.9 consumos específicos a 70°C

V (Km/h)	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª
10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
110,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7218,89	5865,35	4962,99	0,00
120,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9007,43	7318,54	6051,87	0,00

Imagen 5.10 consumo en g/h a 70°C

Si enfriásemos la carrocería obtendríamos las siguientes mejoras de potencia en el motor:

ΔT	P(KW)
De 70°C a 27°C	1,58
De 41°C a 27°C	1,36

Tabla 5.1 Mejora de potencia

Hay que resaltar que los consumos específicos no varían, es por este motivo que las comparaciones se harán posteriormente con el consumo en g/h.

2) Consumo de potencia por el aire acondicionado

Para el cálculo de la potencia necesaria por el aire acondicionado se utilizara la ecuación de la transferencia de calor modelada por la ley de enfriamiento de newton (Ec. 5.1) y aplicada únicamente al capó, que es la zona susceptible a alcanzar la mayor temperatura.

$$dQ = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{inf})$$

Ec. 5.1

Donde:

- 1) H= constante de proporcionalidad entre el flujo de calor y la fuerza motriz termodinámica.
- 2) A=tamaño de la superficie donde se produce la transferencia de calor.
- 3) $T_s - T_{inf}$ = Diferencia de temperaturas entre la temperatura superficial actual y la objetivo.

1) Para el cálculo de H se utiliza el software Heat Transfer en la siguiente configuración:

-Configuración= capa turbulenta en placa plana lisa.

-Fluido=aire.

-Temperatura de la pared= 27°C, la temperatura objetivo.

-Temperatura ambiente= entre 27°C y 70°C.

-Presión= 100.000 Pa.

-Longitud=Longitud de la placa en el sentido de incidencia de la corriente. Tras escalar la maqueta el tamaño es de 2 metros.

-Velocidad del flujo= 33m/s.

-Numero de Reynolds de transición= 50.000.

Comprobamos que el número de Reynolds obtenido en las simulaciones es mayor que el número de Reynolds de transición.

2) A (m²) tendrá unas dimensiones de 2 m² una vez escalado el capó de la maqueta.

3) La diferencia de temperaturas será entre 70°C, 41°C y 27°C

Obtenemos los siguientes coeficientes en Heat Transfer:

T(°C)	h(W/(m ² K°))
70	69,65
41	72,78
27	74,34

Tabla 5.2 Coeficientes de película

Y sustituyendo en la ecuación 5.1 obtenemos:

$h(W/(m^2 K^{\circ}))$	$A(m^2)$	ΔT	ΔT	$P(W)$
72,78	2	De 70°C a 27°C	43	6259,08
74,34	2	De 41°C a 27°C	14	2081,52

Tabla 5.3 Potencia requerida por el aire acondicionado

5.2 Conclusiones:

Comparando las tablas 5.1 y 5.2 apreciamos que en ninguno de los 2 casos, a diferentes temperaturas de partida, se obtiene una mejora de potencia, ya que la potencia requerida al aire acondicionado es mayor que la mejora de potencia obtenida por la bajada en el coeficiente de arrastre.

Al disminuir de 70°C a 27°C estaríamos perdiendo 4679W y de 41°C a 27°C 721W. Por este motivo no es viable usar el aire acondicionado como método de enfriamiento del coche.

Es importante resaltar que la potencia requerida por el aire acondicionado es una aproximación siempre menor a la real porque solo se ha tenido en cuenta el capó y no toda la superficie del coche. Realmente se estaría perdiendo más energía si se enfriase el coche.

Podemos relacionar las potencias con los consumos específicos. Si la potencia requerida por el aire acondicionado la multiplicamos por el consumo específico calculamos el aumento de consumo en g/h. Por otra parte si restamos el consumo con los coeficientes de arrastre a 70°C y a 27°C obtenemos la mejora en el consumo en g/h. Quedando así la siguiente comparativa:

	Potencia aire (KW)	Consumo específico(g/kw*h)	Aumento Consumo (g/h)
De 70°C a 27°C	6,25908	215	1345,7022
De 41°C a 27°C	2,08102	215	447,4193
	Consumo a 70-41°C (g/h)	Consumo a 27°C (g/h)	Disminución consumo(g/h)
De 70°C a 27°C	6051,87	5712,3	339,57
De 41°C a 27°C	6004,49	5712,3	292,19

Tabla 5.4 Comparativa consumo

En la tabla 5.4 se muestra para el caso a 120 Km/h, en sexta marcha, que el aumento en el consumo por el uso del aire acondicionado es mayor que la disminución en el consumo por la bajada de la temperatura superficial y la consiguiente mejora en el coeficiente de arrastre.

Como conclusión final. Se ha demostrado que existe una relación directa entre temperatura de un vehículo y coeficiente de arrastre siguiendo las simulaciones en fluent y tras analizar un método de bajada de la temperatura superficial del vehículo se ha demostrado que no es viable en ningún caso.

Capitulo 6.-Bibliografia

1. [Sham95] Irving H. Shames, 'Mecanica de fluidos' 1995
2. [Wong01] Wong, J. Y, 'Theory of ground vehicles' 2001 Canadá
3. [Shin92] Shin, Jaiwon & H. Bond, Thomas 'Experimental and computational ice shapes and resulting drag increase for a NACA 0012 airfoil' 1992
4. [Ajin16] Ajinkya Krishnakumar, Parth Sharma*, Yash Tambi and B. Ashok 'Establishing Temperature Dependency of the Aerodynamic Drag using CFD and Experimental Analysis' 2016
5. Aire acondicionado del vehículo, funcionamiento
<https://www.hella.com/techworld/es/Informacion-Tecnica/Climatizacion-de-vehiculos/Aire-acondicionado-del-vehiculo-2203/>
6. Mejorar la aerodinámica para impulsar la economía del combustible
<https://www.edmunds.com/fuel-economy/improving-aerodynamics-to-boost-fuel-economy.html>
7. Cuanto afecta la aerodinámica a la eficiencia del combustible
<https://www.quora.com/How-much-does-aerodynamics-affect-fuel-efficiency>
8. Fluidodinámica computacional
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4882/fichero/An%C3%A1lisis+del+sistema+de+ventilaci%C3%B3n+de+un+secadero+solar+mediante+técnica+fluidodin%C3%A1mica+computacional%252FCapitulo+5.+Fluidodin%C3%A1mica+Computacional.pdf>
9. [Bard97] Bardina, J.E., Huang, P.G., Coakley, T.J. , "Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development", NASA Technical Memorandum 110446 (1997)
10. [Wilc98] "Turbulence Modeling for CFD". Second edition. Anaheim: DCW Industries, 1998
11. Condiciones de contorno en flujo libre https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_free-stream_boundary_conditions
12. Coeficiente de arrastre https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient
13. Introducción a ANSYS fluent
https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu_gs/flu_gs_chp_intro_fluent_product.html
14. Algoritmo basado en presión
<https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node987.htm#unsteady-iterate>
15. Introducción a la metodología en CFD
https://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture02-intro-to-cfd.pdf
16. Coeficiente de película
https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer_coefficient
17. Aerodinámica del automóvil, principios básicos
<https://www.diarimotor.com/consejos/aerodinamica-del-automovil-principios-basicos/>
18. Introduction to Using ANSYS Fluent in ANSYS Workbench: Fluid Flow and Heat Transfer in a Mixing Elbow
<http://www.fm.energy.lth.se/fileadmin/fm/Education/Courses/CFD/WBTut1.pdf>