



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Estimación del impacto en las emisiones de CO₂ de
los coches con retrovisores con cámara mediante
simulaciones CFD

Autor: Alfonso Menéndez Herrero

Directores: José Rubén Pérez Domínguez

Luis M. Mochón Castro

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
'Estimación del impacto en las emisiones de CO2 de los coches con retrovisores con
cámara mediante simulaciones CFD'

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2022/23 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.: Alfonso Menéndez Herrero

Fecha: 30/06/2023

Autorizada la entrega del proyecto

LOS DIRECTORES DEL PROYECTO

Fdo.: Luis Manuel Mochón Castro

Fecha: 03/07/2023



Fdo.: José Rubén Pérez Domínguez

Fecha://



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Estimación del impacto en las emisiones de CO₂ de
los coches con retrovisores con cámara mediante
simulaciones CFD

Autor: Alfonso Menéndez Herrero

Directores: José Rubén Pérez Domínguez

Luis M. Mochón Castro

Madrid

ESTIMACIÓN DEL IMPACTO EN LAS EMISIONES DE CO₂ DE LOS COCHES CON RETROVISORES CON CÁMARA MEDIANTE SIMULACIONES CFD

Autor: Menéndez Herrero, Alfonso.

Directores: Pérez Domínguez, José Rubén; Mochón Castro, Luis M.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Por medio del programa de CFD ANSYS se han mallado y simulado tres versiones de retrovisores distintas de creación propia y se concluye que el efecto de los retrovisores con cámara es beneficioso a nivel global, pero inapreciable e incluso perjudicial para un consumidor individual.

Palabras clave: turbulento, simulación, arrastre, retrovisor, coche

1. Introducción

Este proyecto busca una solución que ayude a combatir el cambio climático, enfocándose en la importancia de los gases de efecto invernadero en este fenómeno. El dióxido de carbono (CO₂) liberado por la quema de combustibles fósiles, especialmente en vehículos de motor, contribuye significativamente a las emisiones totales de la Unión Europea y es necesario abordar este problema debido a su impacto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas [1], específicamente en relación con la acción por el clima y las ciudades sostenibles. Existen actualmente medidas legislativas, como la prohibición de la venta de vehículos con motor de combustión a partir del año 2035 [2] y las restricciones de acceso a áreas urbanas, pero en este caso se propone un cambio menos invasivo pero significativo: reemplazar los retrovisores tradicionales por cámaras, lo cual mejora la eficiencia aerodinámica de los vehículos al reducir su resistencia al aire. Esto tiene beneficios tanto ambientales como económicos, al disminuir las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible. Además, ofrece ventajas adicionales, como un mayor campo de visión y una reducción de los deslumbramientos, por lo que aumentaría la seguridad al volante.

2. Definición del proyecto

La base teórica del proyecto establece la relación entre la fuerza de arrastre de un vehículo y el consumo de combustible, el cual está directamente vinculado con la producción de CO₂. Para obtener los valores de dicha fuerza, se utiliza el programa de CFD ANSYS, específicamente Fluent para el mallado y las simulaciones. La geometría del vehículo se diseña desde cero en Design Modeler y se refina en Spaceclaim ya que se ha descartado el uso de modelos descargados de páginas como *GrabCad* debido a los

múltiples errores irreparables que presentan. A partir del modelo base, se crean una versión con retrovisores tradicionales y dos con diferentes diseños de cámaras.

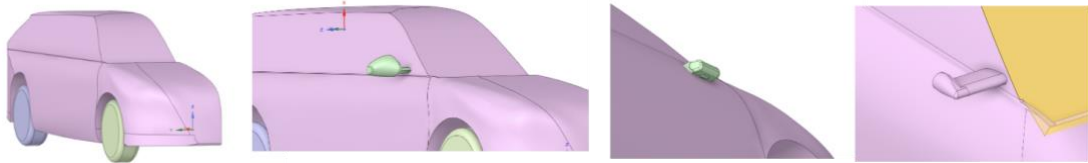


Figura 1 - De izquierda a derecha: Geometría base, retrovisor tradicional, cámara 1 y cámara 2

Después de simular los casos bajo parámetros escogidos según la teoría de CFD expuesta, se obtienen las fuerzas de arrastre y se comparan para evaluar el ahorro de combustible y la reducción de CO₂. También se consideran los efectos del flujo turbulento que puede causar posibles vibraciones y ruidos en el interior del vehículo a través de las ventanillas y se investigan con ayuda de las herramientas *pathlines* y *contours* de Fluent que visualizan el comportamiento del flujo entorno al cuerpo.

3. Resultados

<i>Tipo de retrovisor:</i>	<i>Tradicional</i>	<i>Cámara 1</i>	<i>Cámara 2</i>
F _a [N]	544,4	539,8	534,44
Variación respecto al tradicional [%]	-	0,845	1,83
Ahorro en un coche de combustión [%]	-	0,1352	0,2928

Tabla 1 – Resultados

- Los resultados numéricos muestran una ligera reducción de la fuerza de arrastre que, multiplicada por la proporción que ocupa la resistencia al aire en el gasto energético de un coche, queda por debajo del 0,3% en el mejor de los casos.
- Además, la segunda versión de retrovisor con cámara, que sobresale más del vehículo y se asemeja más a uno tradicional, obtiene mejores resultados que el modelo de cámara que está incorporado en el chasis, con más del doble de beneficio.
- A pesar de ser un valor demasiado bajo para afectar al consumidor individual, la reducción de emisiones de CO₂ en el caso de una implementación a escala mundial equivaldría a que 3,2 millones de coches dejaran de circular.

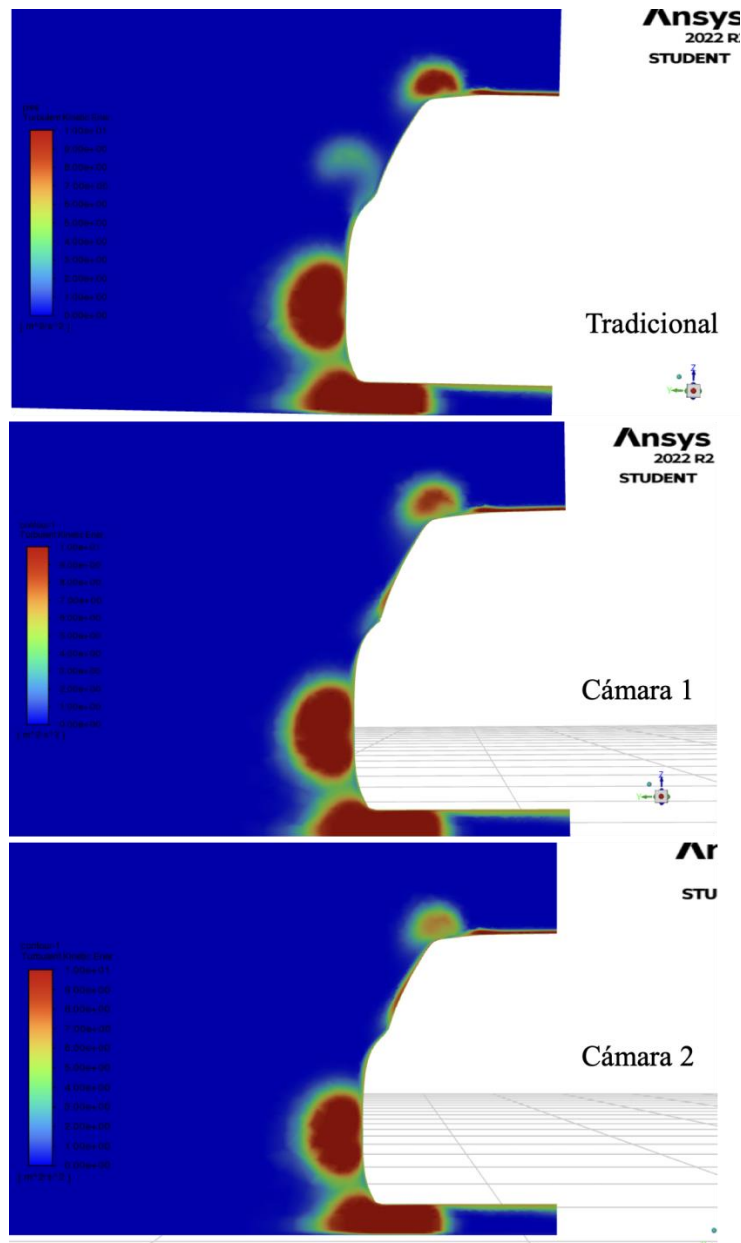


Figura 2 - Flujo turbulento a mitad del cuerpo

- Por otro lado, también se debe tener en cuenta el comportamiento del flujo. En este caso se puede observar que, en un plano longitudinal del vehículo, los retrovisores de cámara tienen una capa de aire turbulento ligada a las ventanillas que podría traspasar vibraciones y ruidos al interior del vehículo.
- En el caso del retrovisor tradicional se aprecia que la magnitud de turbulencias es menor en esa zona, ya que consigue redirigir aire limpio entre su estela y el coche, aislándolo de estructuras indeseadas.

4. Conclusiones

En definitiva, la reducción en la fuerza de arrastre y la emisión de CO₂ al cambiar a retrovisores con cámara es mínima y solo se nota a escala global mientras que, a nivel individual, los pasajeros pueden experimentar incomodidad debido a la falta de capacidad de los retrovisores con cámara para alejar el flujo turbulento que impacta contra las ventanillas. Aunque los resultados numéricos obtenidos en este proyecto son realistas, las simulaciones no son extrapolables al mundo real ya que las geometrías utilizadas no están optimizadas aerodinámicamente y la malla no es lo suficientemente fina para ser fiable. Comparado con otros factores que afectan al arrastre, como abrir las ventanillas, retirar el techo de un coche descapotable o llevar las ruedas ligeramente desinfladas, el efecto de los retrovisores es insignificante. Además, otras prácticas, como las cortinas de aire y el uso de placas planas en los bajos del vehículo, ofrecen resultados similares o mejores en términos de reducción de *drag* y turbulencias. En resumen, aunque implementar múltiples mejoras pequeñas, como las mencionadas, es el camino a seguir, los retrovisores con cámara no parecen ser la opción más recomendable en comparación con otras tecnologías disponibles.

5. Referencias

- [1] PNUD. (n.d.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible | Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo*. [online] Disponible en: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals> .
- [2] Martín, P. (2022). *Prohibir los motores de combustión en la UE en 2035 no será tan fácil: Alemania se opone*. [online] elconfidencial.com. Disponible en: https://www.elconfidencial.com/motor/industria/2022-06-22/ue-emisiones-motores-combustion-christian-lindner_3447795/ .

ESTIMATION OF THE IMPACT ON CO2 EMISSIONS OF CARS WITH CAMERA SIDE MIRRORS USING CFD SIMULATIONS

Author: Menéndez Herrero, Alfonso.

Supervisors: Pérez Domínguez, José Rubén; Mochón Castro, Luis M.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

By means of the CFD program ANSYS, three different versions of side mirrors were meshed and simulated, and the overall results dictated that the effect of camera mirrors is beneficial on a global scale, but negligible and even detrimental to an individual consumer.

Keywords: turbulent, simulation, drag, side-mirror, car

1. Introduction

This project seeks a solution to help combat climate change, focusing on the importance of greenhouse gases in this phenomenon. Carbon dioxide (CO₂) released by burning fossil fuels, especially in motor vehicles, contributes significantly to total emissions in the European Union and this problem needs to be addressed due to its impact on the United Nations Sustainable Development Goals [1], specifically in relation to climate action and sustainable cities. Legislative measures are already in place, such as a ban on the sale of combustion engine vehicles from 2035 onwards [2] and restrictions on access to urban areas, but in this case a less invasive but significant change is proposed: replacing traditional side mirrors with cameras, which improves the aerodynamic efficiency of vehicles by reducing their air resistance. This has both environmental and economic benefits, as it reduces both CO₂ emissions and fuel consumption. It also offers additional advantages, such as a wider field of vision and reduced glare, thereby increasing driving safety.

2. Description of the project

The theoretical basis of the project establishes the relationship between the drag force of a vehicle and its fuel consumption, which is directly linked to CO₂ production. To obtain the values of this force, the CFD program ANSYS is used, specifically Fluent for the meshing and simulations. The vehicle geometry is designed from scratch in Design Modeler and refined in Spaceclaim since the use of models downloaded from sites such as GrabCad has been discarded due to the many irreparable errors that manifest. From the base model, a version with traditional mirrors and two with different camera designs are created.

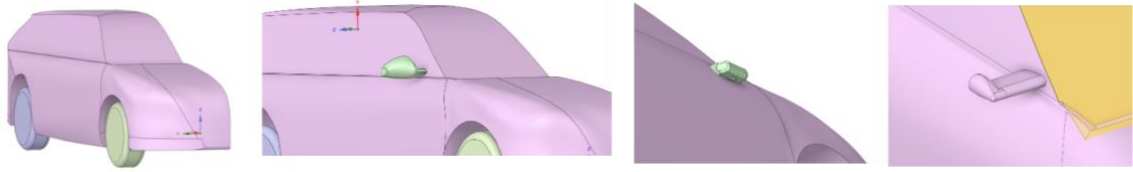


Figure 1 - From left to right: Base geometry, traditional mirror, camera 1 and camera 2.

After simulating the cases under parameters chosen according to the CFD theory presented, drag forces are obtained and compared to evaluate fuel savings and the amount of CO₂ reduction. The effects of turbulent flow that may cause possible vibrations and noises inside the vehicle through the windows are also considered and investigated with the help of Fluent's 'pathlines' and 'contours' tools that visualize the flow behavior around the body.

3. Results

<i>Type of side mirror</i>	<i>Traditional</i>	<i>Camera 1</i>	<i>Camera 2</i>
F _d [N]	544,4	539,8	534,44
Difference [%]	-	0,845	1,83
Savings in an ICE car [%]	-	0,1352	0,2928

Table 1 - Numerical results

- The numerical results show a slight reduction in drag force which, multiplied by the proportion of air resistance in a car's energy expenditure, is less than 0.3% at best.
- In addition, the second version of the camera mirror, which protrudes further from the vehicle and more closely resembles a traditional mirror, performs better than the camera model that is built into the chassis, with more than twice the benefit.
- Although the difference is too low to affect the individual consumer, the reduction in CO₂ emissions in the case of a worldwide implementation would be equivalent to 3.2 million cars being taken off the road.

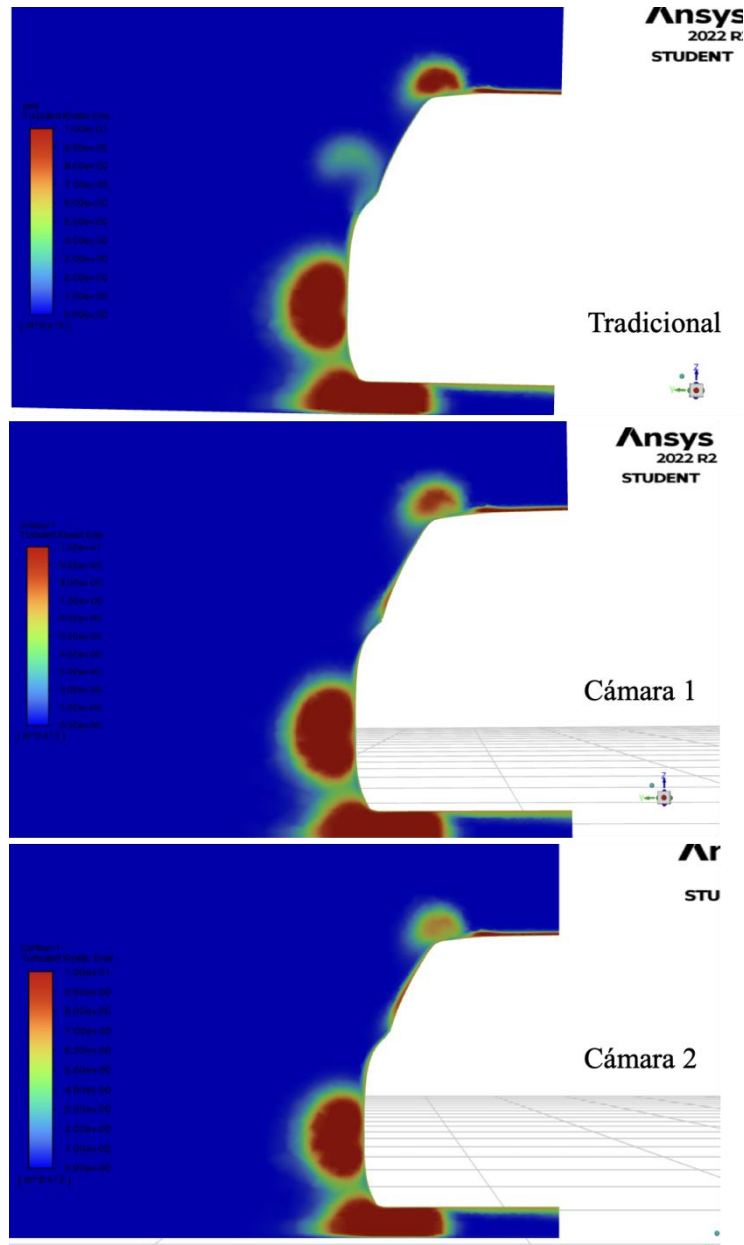


Figure 2 - Turbulent flow around the body

- On the other hand, the flow behavior must also be taken into account. In this case it can be observed that, on a plane halfway along the length of the vehicle, the camera mirrors have a layer of turbulent air attached to the windows that could transfer vibrations and noises to the interior of the vehicle.
- In the case of the traditional rear-view mirror, the magnitude of turbulence is lower in that area, as it manages to redirect clean air between its wake and the car, isolating it from unwanted structures.

4. Conclusions

Ultimately, the reduction in drag force and CO2 emission when switching to camera mirrors is minimal and only noticeable on a global scale while, on an individual level, passengers may experience discomfort due to the camera mirrors' failure to prevent turbulent flow impacting against the windows. Although the numerical results obtained in this project are realistic, the simulations are not extrapolable to the real world as the geometries used are not aerodynamically optimized and the mesh is not fine enough to be reliable. Compared to other factors that affect drag, such as opening windows, removing the roof of a convertible car or carrying slightly underinflated tires, the effect of cameras as side mirrors is negligible. In addition, other practices, such as air curtains and the use of flat plates on the underbody, offer similar or better results in terms of drag and turbulence reduction. In summary, although implementing multiple small improvements, such as those mentioned above, is the way to go, camera mirrors do not seem to be the most advisable option compared to other available technologies.

5. References

- [1] PNUD. (n.d.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible | Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo*. [online] Available at: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals> .
- [2] Martín, P. (2022). *Prohibir los motores de combustión en la UE en 2035 no será tan fácil: Alemania se opone*. [online] *elconfidencial.com*. Available at: https://www.elconfidencial.com/motor/industria/2022-06-22/ue-emisiones-motores-combustion-christian-lindner_3447795/ .

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	6
1.1 Motivación del proyecto	6
1.2 Descripción de los retrovisores de cámara.....	8
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	10
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	11
3.1 Impacto de la aerodinámica en el diseño de los coches	11
3.2 Evolución de los retrovisores.....	14
3.3 Otras formas de mejorar la eficiencia aerodinámica.....	16
Capítulo 4. Bases teóricas.....	19
4.1 Fuerzas sobre un vehículo en movimiento.....	19
4.1.1 Resistencia a la rodadura	20
4.1.2 Drag	20
4.1.3 Pérdidas de un vehículo en movimiento.....	21
4.2 Cálculo de producción de CO ₂	23
4.3 Fundamentos de mecánica de fluidos	23
4.3.1 Navier-Stokes	24
4.3.2 Flujo laminar y turbulento	26
4.3.3 Capa límite	27
4.4 Teoría de CFD.....	30
4.4.1 Fundamentos	30
4.4.2 Mallas.....	31
4.4.3 Modelos viscosos.....	34
Capítulo 5. Definición del Trabajo	38
5.1 Justificación.....	38
5.2 Objetivos	39
5.3 Metodología	40
Capítulo 6. Setup del programa y simulaciones	42
6.1 Modelos.....	42

6.1.1 Modelo con retrovisor tradicional	44
6.1.2 Modelos con retrovisores con cámara	46
6.2 Ajustes del mallado	50
6.2.1 Dominio computacional y refinamientos	50
6.2.2 Configuración de la malla.....	53
6.3 Configuración del solucionador	60
6.3.1 Setup.....	60
6.3.2 Solution.....	62
6.4 Análisis de la convergencia.....	63
Capítulo 7. Análisis de los resultados	66
7.1 Resultados numéricos.....	66
7.2 Análisis del flujo	68
Capítulo 8. Conclusiones.....	75
Capítulo 9. Bibliografía.....	78

Índice de figuras

Figura 1 - De izquierda a derecha: Geometría base, retrovisor tradicional, cámara 1 y cámara 2	7
Figura 2 - Flujo turbulento a mitad del cuerpo	8
Figura 3 – Cámara del Honda e Advance [17]	8
Figura 4 - Interior del Honda e Advance [17]	8
Figura 5 - Honda e Advance [17]	9
Figura 6 - Prototipo Renault Eléctrico [18]	9
Figura 7 - Ford Modelo T [1]	11
Figura 8 - Ilustración antigua de los efectos del aire [2]	12
Figura 9 - Phantom Corsair [3]	12
Figura 10 - Audi RS6 [5]	13
Figura 11 - Retrovisores Antiguos (Chevrolet izquierda [6], Cadillac derecha [7])	14
Figura 12 - Ejemplo de retrovisor moderno [8]	15
Figura 13 - Generadores de vórtices en retrovisores [9]	15
Figura 14 – Simulación: a) sin, b) con cortina de aire [10]	16
Figura 15 - Cortinas de Aire en un camión [11]	17
Figura 16 - Flujo por debajo de un vehículo [12]	17
Figura 17 - Estela detrás de una esfera [21]	21
Figura 18 - Representación de flujos laminar y turbulento [20]	26
Figura 19 - Transición de la capa límite [13]	27
Figura 20 - Velocidades del flujo en la capa límite [13]	27
Figura 21 - Separación de la capa límite [19]	28
Figura 22 - Estela causada por separación del flujo [19]	28
Figura 23 - Generadores de vórtices en un deportivo [22]	29
Figura 24 - Mallas según el tipo de elementos [15]	31
Figura 25 - Adaptación de las mallas a un contorno [23]	31
Figura 26 - Residuales según tipo de malla [15]	32
Figura 27 - Ejemplo de discretización	33

Figura 28 - Hexaedros	33
Figura 29 - Resumen de solucionadores [14]	36
Figura 30 - Flujo simulado por distintos solucionadores [14].....	36
Figura 31 - Geometría base	43
Figura 32 - Geometría base, vista lateral	43
Figura 33 - Geometría base, vista frontal	43
Figura 34 - Geometría base, vista trasera	44
Figura 35 - Nissan Qashqai [38].....	44
Figura 36 - Retrovisor tradicional, vista 1	45
Figura 37 - Retrovisor tradicional, vista 2	45
Figura 38 - Retrovisor tradicional, vista lateral	45
Figura 39 - VW LX1 [39].....	46
Figura 40 - Retrovisor con cámara 1, vista lateral.....	46
Figura 41 - Retrovisor con cámara 1, vista frontal	47
Figura 42 - Retrovisor con cámara 1, vista inferior.....	47
Figura 43 - Honda e: N2 concept [40].....	48
Figura 44 - Retrovisor con cámara 2, vista 1	48
Figura 45 - Retrovisor con cámara 2, vista 2.....	49
Figura 46 - Retrovisor con cámara 2, vista frontal	49
Figura 47 - Retrovisor con cámara 2, vista lateral.....	49
Figura 48 - Dominio computacional, vista isométrica	51
Figura 49 - Dominio computacional, vista lateral	51
Figura 50 - Redondeo entre la rueda y el suelo	51
Figura 51 - BOI vista 1	52
Figura 52 - BOI vista lateral	52
Figura 53 - Generador de mallas de Fluent	53
Figura 54 - Malla del vehículo	54
Figura 55 - Corte en la malla	55
Figura 56 - Valores del mallado superficial	55
Figura 57 - Malla superficial	56

Figura 58 - Malla de las capas límite.....	57
Figura 59 - Corte transversal de la malla.....	58
Figura 60 - Interfaz del solucionador Fluent	60
Figura 61 – Gráficas de los residuales según modelo	64
Figura 62 - Gráficas de Fd según modelo.....	65
Figura 63 - Pathlines del retrovisor tradicional, vista lateral.....	69
Figura 64 - Pathlines del retrovisor tradicional, vista frontal	70
Figura 65 - Pathlines retrovisor de cámara 1	70
Figura 66 - Pathlines retrovisor con cámara 2	71
Figura 67 - Energía cinética turbulenta en $x=1$	72
Figura 68 - Energía cinética turbulenta en $x=2$	73

Índice de tablas

Tabla 1 – Resultados.....	7
Tabla 2 - Pérdidas de energía de un coche según el tipo de propulsión [16]	22
Tabla 3 - Características de la malla.....	59
Tabla 4 - Resultados de las fuerzas	66
Tabla 5 - Resultados finales.....	67

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El cambio climático es uno de los temas más tratados hoy en día, protagonistas del cual son los gases de efecto invernadero. Estos gases nocivos atrapan el calor del sol en la atmósfera y lo retienen cerca de la superficie terrestre, elevando la temperatura. Uno de los principales culpables es el gas CO₂, que representa un 80% de dichos gases en la atmósfera y es liberado en la quema de combustibles fósiles, como el petróleo, el gas natural y el carbón [25]. En el caso de este trabajo se analizará en particular la combustión de la gasolina o el Diesel en automóviles. Según el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, los transportes emitieron una cuarta parte del CO₂ producido en la Unión Europea en 2019, del cual un 60,6% fue emitido por coches, es decir, un 15% de las emisiones totales de la UE [26]. Como resulta evidente por el uso universal de estos vehículos, un cambio pequeño en el consumo de un coche puede resultar en un cambio importante a nivel mundial.

En 2015 las Naciones Unidas adoptaron los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenibles para que en 2030 todas las personas del mundo disfrutasen de paz y prosperidad [24]. Los objetivos 11: creación de ciudades y comunidades sostenibles, 12: producción y consumo responsables y 13: acción por el clima, tienen componentes que se ven afectados por la contaminación de los medios de transporte. Por ende, está claro que es un ámbito que tiene mucho margen de mejora y sobre el cual se está legislando de continuo para lograr un futuro más sostenible. Algunos ejemplos de la actualidad son: la ley de prohibición de la venta de vehículos nuevos con motor de combustión a partir de 2035 [27], que está en la recta final para ser aprobado por el parlamento europeo, y, en Madrid, que solo coches con distintivo ECO o CERO puedan entrar en Madrid Central. Queda claro que se están llevado a cabo grandes esfuerzos para disminuir la contaminación y para promover la compra de coches sin motores de combustión interna.

En este proyecto se propone un cambio poco invasivo que, a pesar de su pequeño tamaño, podría tener un efecto importante si se realiza a nivel mundial. Se trata de cambiar los retrovisores exteriores de espejo tradicionales por retrovisores con cámara. Estos últimos son mucho más pequeños y aerodinámicos, por lo que resultan en un vehículo más eficiente con una menor resistencia al aire, también llamada fuerza de arrastre o *drag* en inglés, que actúa en dirección opuesta al movimiento del vehículo.

Reducir la fuerza de arrastre de un coche es beneficioso en todos los sentidos: en cuanto al medio ambiente reduce las emisiones del gas CO₂ y, además, el gasto de combustible, por lo que el conductor del vehículo ahorrará dinero al no tener que repostar tan a menudo. Además, se espera que al perturbar menos el paso del aire alrededor del coche, se reduzca la cantidad de flujo turbulento y así se proporcione una experiencia más cómoda para los pasajeros, ya que el aire generará menos ruido al impactar con el vehículo. Se profundizará más en estos temas a lo largo de este trabajo.

Teniendo en cuenta la cantidad de nuevas leyes y restricciones que se imponen para limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, este cambio a retrovisores de cámara resulta menos invasivo y beneficia también al conductor. Adicionalmente, tiene ventajas en otros ámbitos, como un mayor campo de visión, que se explicarán en el próximo apartado.

1.2 DESCRIPCIÓN DE LOS RETROVISORES DE CÁMARA

Los retrovisores de cámara son unos dispositivos electrónicos que sustituyen a los espejos tradicionales y que permiten al conductor ver las áreas laterales del vehículo en alta definición. Existen varios conceptos distintos para retrovisores de cámara: Algunos están posicionados de la misma forma que los retrovisores tradicionales, pero son más finos, mientras otros están prácticamente incorporados en la carrocería del vehículo, como en el caso del Honda e Advance (Figura 3).



Figura 3 – Cámara del Honda e Advance [17]

Así, en vez de mirar a los espejos, los conductores tendrán unos monitores dentro del habitáculo del vehículo donde podrán ver lo que ocurre a su alrededor (Figura 4).



Figura 4 - Interior del Honda e Advance [17]

Además de la mejora aerodinámica, la opción con cámara tiene varias ventajas añadidas. En primer lugar, el conductor tiene que desviar menos su vista de la carretera, ya que las pantallas se encuentran en el interior. De esta manera aumenta considerablemente la

seguridad al conducir, porque el conductor pasa más tiempo con la vista centrada en la carretera. En segundo lugar, no será necesario ajustar los espejos cada vez que se quiera cambiar de conductor, debido a que los *displays* siempre mostrarán el ángulo correcto, independientemente del piloto, facilitando los típicos cambios de conductor en viajes largos y asegurando que siempre se vean las zonas importantes alrededor del vehículo. Por último, las cámaras están diseñadas de tal forma que eliminan los ángulos muertos que tienen los sistemas de espejo tradicionales, lo que reduce el riesgo de accidente por colisiones o de atropellos, especialmente en los casos de autobuses o camiones que tienden a tener grandes áreas sin visión.



Figura 5 - Honda e Advance [17]



Figura 6 - Prototipo Renault Eléctrico [18]

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

La investigación que se desea llevar a cabo en este Trabajo de Fin de Grado exige la simulación de flujos alrededor de cuerpos mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Se usará el programa ANSYS exclusivamente, tanto para generar la geometría y la malla como para simular y analizar los resultados. La versión disponible de este programa es la licencia académica de 2022, que tiene un límite de 512.000 celdas, lo cual es un número bastante bajo para los estándares de la industria. Se entrará más en detalle sobre esta limitación en el capítulo 6.2.2.

Dentro de ANSYS, se empleará Design Modeler y Spaceclaim para generar la geometría basada en el contorno de un turismo genérico y posteriormente se pasará al mallado y solución del caso en FLUENT. En el Capítulo 6. se especificarán los ajustes escogidos en cada paso de la simulación.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.1 IMPACTO DE LA AERODINÁMICA EN EL DISEÑO DE LOS COCHES

Históricamente, el diseño de coches no siempre se ha centrado en buscar la máxima eficiencia aerodinámica, sino que también se ha visto fuertemente influenciado por las corrientes artísticas de cada época [30].



Figura 7 - Ford Modelo T [1]

Comenzando con el Ford Modelo T, considerado el primer automóvil producido en cadena a principios del siglo XX, se puede apreciar claramente que no hay ningún tipo de consideración por un diseño eficiente (Figura 7).

En aquel entonces, los conocimientos sobre el comportamiento del aire alrededor de cuerpos eran escasos, la industria de la aviación apenas estaba despegando, con los primeros vuelos tripulados ocurriendo en 1903 por los hermanos Wright. Poco a poco se iba entendiendo el potencial del aire y su comportamiento, desbloqueando su uso como herramienta para estabilizar, crear carga y sustentación o simplemente lograr un cuerpo más eficiente. En la Figura 8 se aprecia una primera ilustración que representa la resistencia al viento de un vehículo de forma idealizada.

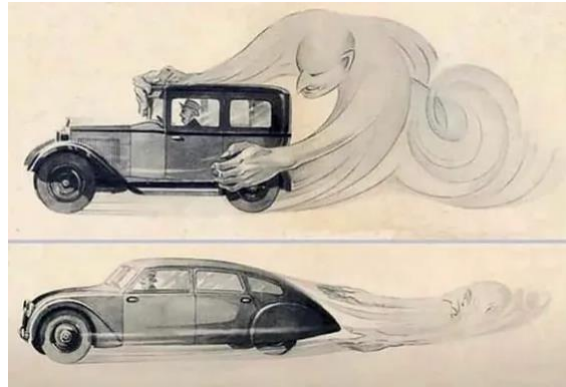


Figura 8 - Ilustración antigua de los efectos del aire [2]

En los años 30, influenciado por el movimiento artístico Art Deco, que buscaba estilizar las formas geométricas, los coches evolucionaron hacia cuerpos más curvos y menos agresivos que no interferían tanto con el flujo de aire. Esta idea se llevó al extremo con el Phantom Corsair (Figura 9), que no fue bien recibido debido a su diseño radical:



Figura 9 - Phantom Corsair [3]

Se aprecia claramente la influencia de la industria aeronáutica, con una apariencia limpia y líneas continuas sin esquinas agresivas, además de cubrir las ruedas prácticamente al completo.

A pesar de que en ciertas épocas se prefiriese un diseño más rectangular que curvado, como en los años 60 a raíz de la corriente del modernismo, el constante aumento del precio de la gasolina desde la crisis energética de los años 70s ha llevado a que el bajo consumo del coche y, por lo tanto, una alta eficiencia aerodinámica, entre otros, sea uno de los principales requisitos de los compradores [29]. A causa de esto, se pasó a invertir más recursos en túneles

de viento y preferir diseños más suaves y curvados. Hoy en día, al problema del alto coste de combustibles se le suma la baja autonomía de los coches eléctricos que ocupan cada vez un porcentaje mayor del mercado, por lo que da igual el tipo de coche del que se trate, la eficiencia siempre será clave.

En los diseños modernos, para no perder la apariencia más dinámica y agresiva de las líneas rectas y ángulos agudos, se incorporan estas dentro de los elementos de la carrocería, por ejemplo, en los faros y en el morro del vehículo, tal y como se puede apreciar en el Audi RS6 Avant (Figura 10). No obstante, el contorno del coche siempre será diseñado con la eficiencia aerodinámica en mente.



Figura 10 - Audi RS6 [5]

3.2 EVOLUCIÓN DE LOS RETROVISORES

En lo que al ámbito de los retrovisores concierne, se puede notar un cambio muy visible en el diseño de estos, así como de la forma en la que se fijan a la carrocería.



Figura 11 - Retrovisores Antiguos (Chevrolet izquierda [6], Cadillac derecha [7])

Como se puede observar, a pesar de que había distintos estilos, los retrovisores planos y cuyo perfil completo protruía directamente de las esquinas inferiores de las ventanillas eran lo común. Se pretendía ayudar en la extracción del aire turbulento generado por el capó y la luna delantera, pero el resultado era el contrario, debido a que el flujo se separaba del retrovisor y dejaba detrás de él una estela de baja presión y turbulencias. Al golpear este aire con los laterales de los coches producía vibraciones y ruido que se notaba en el interior [31].

Para combatir este problema se convirtió en práctica habitual el separar los retrovisores del vehículo y anclarlos a la puerta por debajo de la línea de la ventanilla. Gracias a esto, se permite que aire limpio se interponga entre el vehículo y la estela turbulenta causada por los retrovisores, aliviando los problemas anteriormente mencionados. Asimismo, también la forma de los retrovisores es vital. En vez de ser planos o angulados, actualmente tienen una curvatura gradual que retrasa la separación del flujo lo máximo posible, lo cual se simulará y analizará más adelante.



Figura 12 - Ejemplo de retrovisor moderno [8]

Aparte de esto, es común introducir elementos generadores de vórtices en esta zona, para energizar y ordenar el flujo de aire próximo al coche. Como se explicará más adelante, los vórtices retrasan la separación del flujo y como en este caso se busca que el aire siga el perfil el máximo de tiempo posible, estos pequeños elementos, aunque parezcan insignificantes, pueden marcar una diferencia relativamente grande, sobre todo en cuanto a reducción de vibraciones y ruido.



Figura 13 - Generadores de vórtices en retrovisores [9]

En definitiva, se han llevado a cabo grandes mejoras en la eficiencia aerodinámica de los vehículos, cuidando todo tipo de detalles como el contorno y posicionamiento de los retrovisores. Como esta área parece que ha llegado a su techo de desarrollo, parece claro que el siguiente paso para mejorar este ámbito es hacia los retrovisores de cámara.

3.3 OTRAS FORMAS DE MEJORAR LA EFICIENCIA AERODINÁMICA

Por otro lado, hay otras tecnologías que también se han diseñado para minimizar el *drag* del vehículo y que se pueden emplear en conjunto con los retrovisores de cámara. Dos ejemplos muy extendidos son los fondos planos y las cortinas de aire (por su término en inglés “air curtains”). A continuación, se dará un breve resumen de sus funcionamientos.

Una de las principales fuentes de aire turbulento y, por ende, de *drag*, son las ruedas. Al girar, la parte superior de la rueda avanza con una velocidad dos veces mayor que la del vehículo y al chocar con el flujo de aire, este se desprende generando vórtices y pérdidas. Además, en la zona de contacto entre la rueda y el suelo, el aire no tiene por donde escaparse y nuevamente genera vórtices muy potentes y zonas de alta presión. Para reducir estos efectos muchos coches han incorporado cortinas de aire que distribuyen el aire de la parte frontal del coche y la expulsan justo delante de la rueda para reducir la estela de esta (Figura 14). A priori, el efecto parece pequeño, pero teniendo en cuenta que la estela generada por la rueda delantera entrará en contacto con el costado del vehículo durante todo su largo, cualquier pequeño cambio se verá magnificado aguas abajo [33].

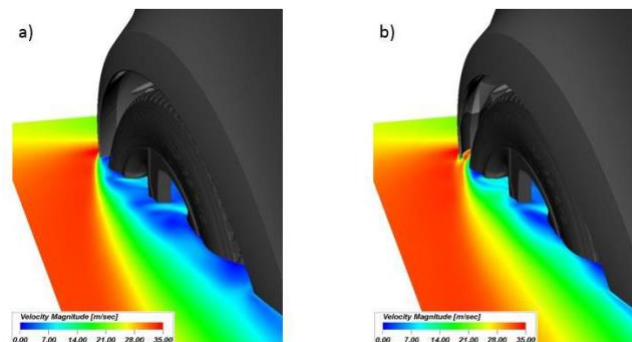


Figura 14 – Simulación: a) sin, b) con cortina de aire [10]

Debido a esto, las cortinas de aire son muy eficientes y útiles, en especial en camiones que debido a su forma y gran área frontal tienen muchas pérdidas por desprendimiento en las esquinas delanteras (Figura 15). Hoy en día, prácticamente todos los coches y camiones nuevos las llevan incorporadas de serie.



Figura 15 - Cortinas de Aire en un camión [11]

Otra modificación muy beneficiosa es aplanar el suelo del vehículo en turismos, que normalmente tiene muchos bultos e irregularidades, por ejemplo, debido a los tubos de escape o a los ejes del coche. El flujo de aire que intenta pasar por debajo del coche se frena por las turbulencias causadas por estos elementos y genera una zona de alta presión, la cual genera *drag* y, además, *lift* (fuerza de sustentación), que hace que el coche sea menos maniobrable y más inestable a altas velocidades. La instalación de placas debajo de estos elementos facilita el paso del aire entre el coche y el suelo, eliminando esta zona indeseada de alta presión. Este flujo de aire más limpio puede incluso ser usado para crear *lift* negativo, también llamado carga aerodinámica, mediante un difusor, como ocurre en los coches de carreras (Figura 16).



Figura 16 - Flujo por debajo de un vehículo [12]

En definitiva, el diseño de un coche tiene un componente artístico y uno aerodinámico que se tienen que equilibrar. No se puede diseñar solo con la eficiencia en mente, ya que el diseño no gustaría al público, como fue el caso del Phantom Corsair, pero tampoco se puede omitir

totalmente por el alto coste de los combustibles o la limitada autonomía de las baterías, en los casos de los coches de combustion o eléctricos respectivamente.

Se ha tratado la evolución histórica de los automóviles y presentado algunas de las soluciones más comunes a los problemas aerodinámicos. A continuación, se profundizará en los beneficios que pueda tener un cambio a nivel mundial a retrovisores de cámara, ya que según se ha comentado, parece ser el próximo salto adelante en la optimización aerodinámica de los coches.

Capítulo 4. BASES TEÓRICAS

En este capítulo se expondrán las bases teóricas y los cálculos necesarios para llevar a cabo las simulaciones y posteriormente sacar conclusiones de los resultados. En primer lugar, se describirán las fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento y como calcular la producción de CO₂ en función de ellas. Después, se explicarán las bases de la mecánica de fluidos y como los programas de CFD la usan para resolver los distintos casos que se le exigen.

4.1 FUERZAS SOBRE UN VEHÍCULO EN MOVIMIENTO

Las fuerzas que actúan sobre un coche en movimiento varían dependiendo de la situación en la que se encuentre. Por ejemplo, al girar en una curva aparecerán fuerzas laterales sobre las ruedas que deben mantener el coche en su trayectoria, actuando en contra de la inercia del vehículo que se resiste a realizar el giro. En el caso de estar subiendo o bajando una pendiente, la fuerza gravitacional tendrá un componente que frenará o acelerará al vehículo.

En este proyecto se simplificará el modelo a un coche conduciendo en un tramo llano y recto, ya que las demás fuerzas no son relevantes. Además, como se explicará en el siguiente apartado, el *drag* de un cuerpo aumenta con mayor velocidad del fluido, por lo que el caso más relevante para simular será a la máxima velocidad a la que suelen conducir los vehículos, es decir, el límite de velocidad en autopista en España (120km/h). Se analizará a velocidad constante, sin aceleración o deceleración. Por lo tanto, las fuerzas que actúan sobre un coche serán: la fuerza de arrastre F_d , la resistencia al rodamiento F_r y el impulso del motor, el producto de masa por aceleración será nulo.

$$M \cdot a = 0 = F_{motor} - F_d - F_r$$

E. 1 - Fuerzas sobre un vehículo

4.1.1 RESISTENCIA A LA RODADURA

La resistencia a la rodadura se produce por la deformación de las ruedas durante la conducción y se opone a la fuerza de empuje generada por el motor. Su valor depende de la masa del coche, de la geometría de dirección, del tipo, perfil y presión de inflado de los neumáticos, de la velocidad de marcha y del estado y superficie de la carretera.

El cálculo de esta resistencia es sencillo:

$$Fr = m \cdot \mu_r$$

E. 2 - Resistencia a la rodadura

El coeficiente de rodadura μ_r encapsula los efectos anteriormente mencionados y para una carretera en buen estado y unas condiciones normales vale entre 0,02 y 0,04. La M es la masa del vehículo [34]. Como estos valores son constantes e independientes de la velocidad y de la geometría o aerodinámica del vehículo, no se verán afectados por los cambios en los retrovisores que se realizarán más adelante.

4.1.2 DRAG

La fuerza de arrastre o *drag* se rige por la siguiente ecuación [35]:

$$F_d = c_d \cdot \rho \cdot A_{frontal} \cdot \frac{v^2}{2}$$

E. 3 - Drag

Es decir, considerando una densidad del fluido constante, la fuerza es proporcional al coeficiente de *drag*, al área frontal del objeto (vista desde la dirección del fluido) y al cuadrado de la velocidad del flujo. Esta última relación cuadrática indica que los efectos aerodinámicos jugarán un papel mucho más importante a grandes velocidades. Las variables que dependen de la geometría del cuerpo son el área frontal y el coeficiente de *drag*, por lo que estas describen por completo el comportamiento del objeto en un fluido. Específicamente, el coeficiente adimensional c_d permite comparar directamente la eficiencia de geometrías similares, sin necesidades de cálculos. Por lo tanto, para lograr un mejor

diseño se debe tratar tanto de minimizar el área frontal del objeto, como de lograr una forma tridimensional aerodinámica.

En general, el *drag* es generado por la distribución de presiones alrededor del cuerpo y actúa en dirección normal a la superficie. En la parte frontal de un cuerpo, la presión es alta debido a que el cuerpo debe apartar el fluido de su camino, mientras que en la parte trasera se genera una región de presión baja, ya que el fluido se desprende del cuerpo y no vuelve a su posición original, dejando una estela detrás del objeto (Figura 17). Estos dos efectos sumados componen el llamado *drag* de forma. Existe también rozamiento entre el flujo y el cuerpo, pero por lo general es despreciable en comparación con la resistencia generada por el diferencial de presiones.

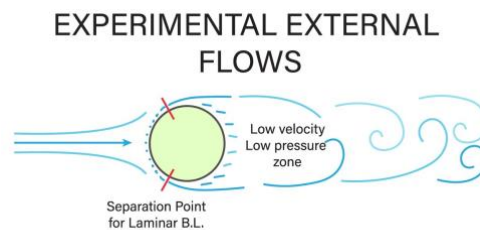


Figura 17 - Estela detrás de una esfera [21]

En el apartado 4.3 se profundizará en la teoría de la mecánica de fluidos.

4.1.3 PÉRDIDAS DE UN VEHÍCULO EN MOVIMIENTO

La **Error! Reference source not found.** que se encuentra a continuación, preparada por el Departamento de Energía del gobierno de los Estados Unidos, proporciona datos sobre las ineficiencias de un vehículo que circula en una autopista. La energía que se transmite a las ruedas es la suma de los porcentajes de resistencia a la rodadura, resistencia aerodinámica y energía disipada durante el frenado, de las cuales esta última se ha incorporado en el porcentaje restante en la fila inferior de la tabla.

En el caso de los coches de combustión o híbridos, los motores son la principal fuente de pérdidas energéticas, ya que estos solo alcanzan una eficiencia en torno al 30% para motores

de gasolina y del 40% para los de Diesel. No obstante, la resistencia al aire ocupa el segundo lugar en cuanto a ineficiencias, con valores entre el 16% y el 19%. En los coches eléctricos este porcentaje se dispara hasta convertirse en la fuente principal de pérdidas al disipar casi la mitad de la energía de un coche, ya que los motores eléctricos son capaces de transformar la corriente eléctrica en energía cinética eficientemente y pierden solo un 15% de su energía. Debido al aumento en la producción de este último tipo de coches, queda claro que disminuir la resistencia al viento es primordial en general y más aún en los coches eléctricos.

<i>Tipo de motor:</i>	<i>Gasolina</i>	<i>Híbrido</i>	<i>Eléctrico</i>
Motor	68%	64%	15%
Rodamiento	7%	10%	23%
Aire	16%	19%	47%
Resto	9%	7%	15%

Tabla 2 - Pérdidas de energía de un coche según el tipo de propulsión [16]

El Departamento de Energía también presenta la misma tabla, pero en referencia a la conducción por ciudad, es decir, a velocidades inferiores y teniendo en cuenta paradas en semáforos, etc. En estos casos, el porcentaje de las pérdidas causadas por la resistencia al aire se reduce en torno a la mitad o menos, dependiendo del tipo de vehículo. Por ende, los beneficios de una buena aerodinámica del vehículo, que priorice la eficiencia, se verán recompensados especialmente a velocidades altas como las que son comunes en autopistas.

4.2 CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE CO₂

La producción de CO₂ se va a calcular de forma aproximada con ayuda de la **Error! Reference source not found.**, al establecer una relación directa con la diferencia porcentual en la fuerza de arrastre según el modelo de retrovisor. Para ello, se multiplicará dicho ahorro por el porcentaje que representa la resistencia aerodinámica según el tipo de vehículo en la tabla para obtener la variación total que experimentará la demanda de potencia del motor.

Asumiendo una proporcionalidad directa entre la fuerza generada por un motor y su gasto de combustible resulta trivial calcular el CO₂ generado, ya que un motor diésel genera 2,64kg de CO₂ por litro y uno de gasolina 2,392kg de CO₂ por litro [45], es decir, también son directamente proporcionales. Gracias a estas relaciones, se puede asumir que la variación porcentual en la potencia del motor es igual a la del CO₂ generado, lo cual se puede extrapolar a nivel global. Además, también es aplicable para vehículos eléctricos porque, aunque no generen CO₂ directamente, la electricidad con la que se recargan sus baterías procede de una mezcla de métodos de generación, entre los que algunos sí que emiten dicho gas nocivo. A causa de esto, es difícil decir exactamente cuántos kg de CO₂ son consecuencia del uso de vehículos eléctricos, porque el origen de la energía depende de las políticas energéticas de cada país. No obstante, la variación porcentual de las fuerzas generadas por el motor resulta ser la medida más útil, porque se puede usar en cualquier caso según la proporción de vehículos de combustión, eléctricos o híbridos que se tenga y según la procedencia de la electricidad con las que se cargan las baterías.

4.3 FUNDAMENTOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS

En este apartado se explicarán brevemente las bases de la mecánica de fluidos, sobre las que trabajan los modelos de simulación CFD. Se describirán las ecuaciones de Navier-Stokes, la capa límite de un fluido, su transición de flujo laminar a turbulento y también su separación de un cuerpo [35].

4.3.1 NAVIER-STOKES

Primero, la mecánica de fluidos en flujos externos se basa en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes. Con ellas se estudia el movimiento de un fluido y las fuerzas que lo provoca aplicando leyes de la mecánica y de la termodinámica.

Se trata de 3 ecuaciones de derivadas parciales no lineales a las que se le suma la ecuación de estado, la de conservación de la energía y la de continuidad.

Las 5 ecuaciones en forma diferencial son:

Ecuación de conservación de masa o de continuidad: la masa que entra en un volumen de control debe ser igual a la que sale.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

E. 4 - Conservación de la masa

Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, una por cada eje (x, y, z), tres en total: Según las leyes de Newton, la inercia se conserva en un cuerpo y cualquier variación se debe a una fuerza externa.

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v}$$

E. 5 - Conservación de la cantidad de movimiento

Ecuación de la conservación de la energía: Según las leyes de la termodinámica la energía no se puede generar ni destruir, por lo que la energía que entra al volumen de control se mantiene dentro o sale del mismo.

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{v} \cdot \tau) - \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = \rho \frac{De}{Dt}$$

E. 6 - Conservación de la energía

Y por último la ecuación de estado, que relaciona la presión con la densidad y la temperatura:

$$p = \rho RT$$

E. 7 - Ecuación de estado

Las incógnitas que se buscan son: la densidad, la temperatura, la presión y las tres velocidades (una por cada eje). De la ecuación de continuidad (E. 4) se obtendrá la densidad, de la de energía (E. 6), la temperatura, de la de estado (E. 7), la presión y de la conservación de cantidad de movimiento (E. 5) se sacarán las velocidades.

Debido a que las ecuaciones diferenciales no son lineales, no tienen una solución completa, por lo que deben ser aproximadas mediante un método numérico, como el CFD en el que se usan funciones que introducen variables adicionales que si se pueden resolver. Del funcionamiento de los programas CFD se hablará más en detalle en el apartado 4.4.

Otra ecuación muy común y relevante en la mecánica de fluidos, que se deriva del principio de conservación de la energía en la termodinámica, es la ecuación de Bernoulli (E. 8), que relaciona la velocidad con la presión en un fluido. De ella se puede entender fácilmente como cuando un flujo se acelera la presión debe reducirse para que la ecuación se mantenga constante. Este principio se usa en los perfiles de ala tanto para crear carga aerodinámica en los coches como para crear sustentación en los aviones.

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} = cte$$

E. 8 - Ecuación de Bernoulli

4.3.2 FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO

Antes de comenzar cabe destacar que en la mecánica de fluidos es común considerar el cuerpo como estático y el fluido con velocidad de traslación, aunque se trate de un vehículo conduciendo en un entorno sin viento, porque se observa desde el punto de vista relativo del cuerpo en movimiento, desde el cual el fluido es el que tiene velocidad.

Existen dos tipos de flujo en la mecánica de fluidos, el laminar y el turbulento (Figura 18). En un flujo laminar las partículas se mueven de forma ordenada, predecible y estacionaria. Gracias a esto es más sencillo diseñar cuerpos en estas condiciones, porque la variabilidad es menor y se puede esperar un cierto comportamiento del flujo. En cambio, el flujo turbulento está compuesto por estructuras complejas, como vórtices y recirculaciones y es no estacionario. Es una tarea más compleja el diseño de perfiles bajo estas condiciones, ya que la velocidad del flujo no es constante ni en su dirección ni en su magnitud. Asimismo, genera una mayor cantidad de ruido y vibraciones que se deben tener en cuenta estructuralmente y también pensando en el confort de las personas, por ejemplo, en el caso de los pasajeros de un vehículo. No obstante, el flujo turbulento tiene el beneficio de retrasar la separación de la capa límite, fenómeno que se explicará más adelante.

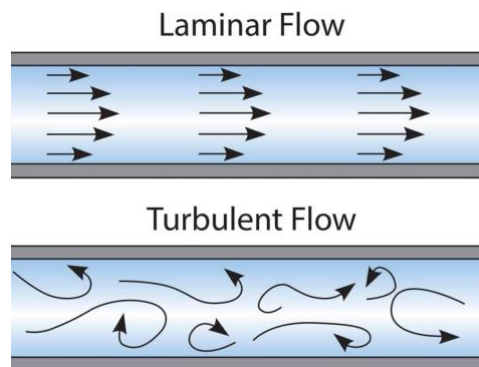


Figura 18 - Representación de flujos laminar y turbulento [20]

Es común en un flujo laminar en contacto con un cuerpo que transicione a turbulento y para predecir este comportamiento se usa el número adimensional de Reynolds (E. 9). Este número muestra la relación entre las fuerzas inerciales y las viscosas de un fluido y depende de la densidad, la viscosidad, la velocidad y una longitud característica que suele ser el largo

del cuerpo en la dirección del fluido. Para flujos externos la transición de laminar a turbulento comienza entorno a $Re = 5 \cdot 10^5$. Por ende, por debajo de ese valor se puede considerar laminar y generalmente por encima de $Re = 10^7$ completamente turbulento.

$$Re = \frac{\rho v L_c}{\mu}$$

E. 9 - Número de Reynolds

Conocido este número se puede resolver en función de L_c y conocer la distancia a la que el flujo pasará a turbulento. Este dato es muy útil y se debe tener en cuenta a la hora de diseñar una geometría.

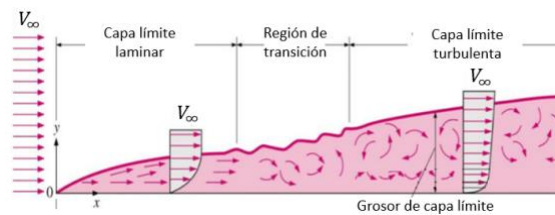


Figura 19 - Transición de la capa límite [13]

4.3.3 CAPA LÍMITE

El concepto de la capa límite se puede visualizar fácilmente con un flujo paralelo a una placa plana (Figura 20). Debido a la viscosidad del fluido, la velocidad del flujo en contacto con la placa es nula, esto se denomina condición de no deslizamiento. Por lo tanto, la velocidad (V_0) aumenta gradualmente desde cero hasta la velocidad del flujo no perturbado (V_∞).

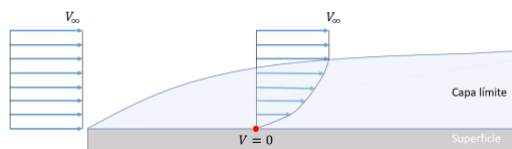


Figura 20 - Velocidades del flujo en la capa límite [13]

Debido a gradientes de presión adversos, que actúan en contra de la dirección del flujo, puede darse el caso de que parte de la capa límite llegue a tener una velocidad negativa y circule

en contra de la dirección original. Esto se llama separación de la capa límite y recirculación del flujo:

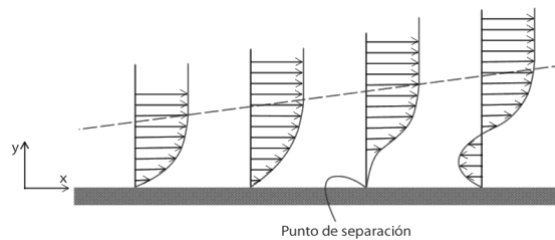


Figura 21 - Separación de la capa límite [19]

En la Figura 21 la presión a la derecha es mayor que a la izquierda, por lo que la capa límite se separa. Generalmente, se intenta evitar dicha separación en especial en las lunas traseras de los vehículos o los alerones en coches de carreras, debido a que, si se separa el flujo en esas partes, generarán una zona de baja presión detrás de las geometrías que aumentará el coeficiente de *drag* del vehículo considerablemente, así como provocar una pérdida de la carga aerodinámica que se pretendía generar en el caso de los alerones.



Figura 22 - Estela causada por separación del flujo [19]

La Figura 22 muestra claramente un flujo separado que no es capaz de seguir el perfil del ala, por lo que será incapaz de generar sustentación. Asimismo, resulta evidente que la estela detrás del cuerpo es mucho mayor que sin separación, por lo cual la región de presión baja y, por ende, el *drag* es mucho mayor. A este tipo de aire turbulento y con vorticidades se le llama aire sucio.

Debido a su naturaleza inestable, la capa límite turbulenta se está mezclando continuamente en dirección perpendicular a la superficie que recorre, transfiriendo energía cinética de las capas de fluido alejadas con velocidades altas a las capas cercanas al cuerpo con velocidades bajas, por lo que se energiza el flujo. A raíz de esto, se logra retrasar la separación del flujo en comparación con el flujo laminar y permite diseñar perfiles con curvaturas más agresivas. Precisamente para esta función están diseñados los generadores de vórtices (Figura 23) que producen un efecto giratorio en el flujo y fuerzan el efecto anteriormente mencionado. Se usan extensamente en los coches deportivos y de carreras para implementar alerones con mayor ángulo de ataque que mantienen el flujo pegado al perfil y lograr así un mejor rendimiento. En la Figura 23 los generadores justo delante de la luna trasera ayudarán a que el flujo no se separe en esa zona y el alerón trasero esté siempre alimentado.



Figura 23 - Generadores de vórtices en un deportivo [22]

Como curiosidad, este fenómeno no afecta solo al mundo del automovilismo, en general todo tipo de objeto en contacto con un fluido sufrirá sus efectos. Un ejemplo de la vida cotidiana son las bolas de golf. Los pequeños huecos, llamados alvéolos, en su superficie actúan como generadores de turbulencias, perturbando el flujo. Como ya se ha discutido anteriormente, de esta forma se logra una estela menor y, por lo tanto, que la bola llegue más lejos.

4.4 TEORÍA DE CFD

4.4.1 FUNDAMENTOS

CFD, o mecánica de fluidos computacional en castellano, es una herramienta de Software que permite simular problemas de fluidos mediante métodos numéricos. No solo se usa en la industria del automóvil, sino que también permite la simulación de todo tipo de flujos, como la sangre, el agua o de corrientes térmicas, por lo que se emplea extensamente en la medicina, el sector marítimo, y en el diseño de refrigeración de casas o componentes electrónicos, entre otros muchos ámbitos.

Como se ha observado en el apartado de teoría de fluidos (4.3), las ecuaciones a resolver son derivadas parciales y se deberían integrar para obtener el resultado, pero esto resulta imposible, ya que la complejidad de las ecuaciones sumadas al enorme volumen de datos a evaluar exigiría una gran potencia computacional y unos tiempos de simulación inasumibles. A causa de esto, se aproxima el resultado discretizando las ecuaciones y resolviéndolas localmente en determinados puntos, que son los llamados nodos de la malla, que se describirá después. Este proceso forma parte del método de elementos finitos [36].

El proceso de simulación se divide en 3 pasos característicos:

1. Pre-procesado: que incluye la introducción manual por parte de un ingeniero de datos como el cuerpo que se desea simular, el dominio computacional y los ajustes del ‘setup’ que incluyen la malla, el modelo de simulación y las condiciones bajo las que se quiere solucionar el problema. Se entrará más en detalle sobre este paso más adelante.
2. Solución: este paso lo lleva a cabo el ordenador sin ningún ‘input’ por parte del usuario. Se simula el caso, según los parámetros escogidos, mediante la discretización de las ecuaciones mencionadas en el apartado teórico de fluidos (4.3.1) y su solución con la ayuda de métodos iterativos.
3. Post-procesado: el ingeniero debe evaluar si la simulación ha convergido y si tiene suficiente calidad como para ser fiable. Posteriormente, se analizan los resultados

obtenidos como fuerzas, presiones y flujos y se procede a visualizar los resultados por medio de gráficas, contornos de presiones y líneas de fluido.

4.4.2 MALLAS

La malla está compuesta por elementos que unen nodos entre sí. Estos pueden tener forma de tetraedros, hexaedros o poliedros entre otros (Figura 24), y de su forma dependerá la interconexión entre los nodos, ya que al solucionar las ecuaciones en un punto solo se tienen en cuenta los datos de los nodos adyacentes a los que está conectado.

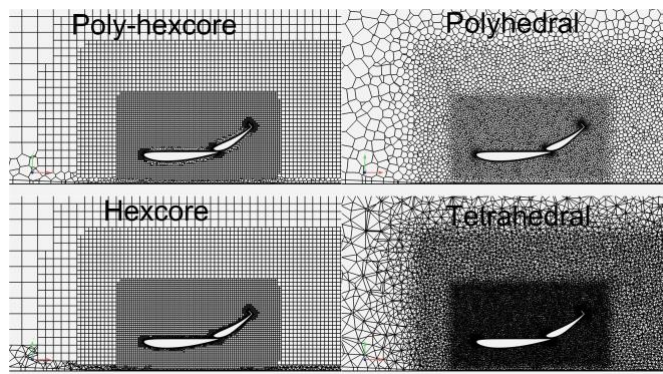


Figura 24 - Mallas según el tipo de elementos [15]

Por lo general, los hexaedros tienen más error cerca de los cuerpos, debido a que su forma no les permite adaptarse correctamente a la figura deseada, mientras que los poliedros y tetraedros tienen una mayor capacidad de moldearse a los contornos (Figura 25).

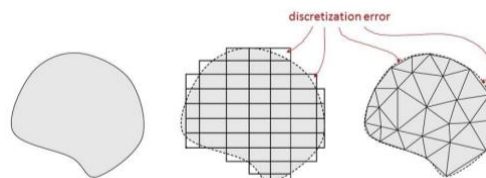


Figura 25 - Adaptación de las mallas a un contorno [23]

Los poliedros suelen ser la forma más eficiente y con menor número de celdas sin luego sacrificar la calidad de los resultados. Además, converge más rápido y de forma más estable

que las otras opciones (Figura 26). Los tetraedros suelen tener el mayor número de elementos por lo que exigen más RAM y tiempo de computación para su resolución así que no es recomendado usarlo en estos casos, especialmente usando la licencia de estudiante de ANSYS que, como ya se ha mencionado anteriormente, tiene un límite de celdas de 512.000 por lo que la eficiencia es clave para obtener un buen resultado. Los hexaedros no ofrecen ningún beneficio aparente, más allá de su simplicidad a la hora de resolverlos. Por ello, en geometrías simples como la de la Figura 24 se recomienda el uso de poliedros cerca y hexaedros lejos del cuerpo, llamado *poly-hexcore*, que combina la precisión del primer tipo en las zonas que lo exigen y la simplicidad del segundo en las zonas alejadas de gradientes. No obstante, para cuerpos más complejos en los que se desea analizar la estela y también los efectos sobre el fluido lejano al cuerpo es recomendable el uso de poliedros en su totalidad, que encuentra un buen balance entre rapidez, robustez y precisión [15].

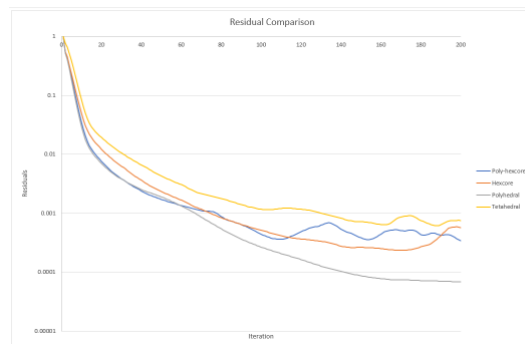


Figura 26 - Residuales según tipo de malla [15]

El tamaño de las celdas de la malla es un factor muy importante. Debido a la discretización de las ecuaciones, cuantos más elementos haya más se asemejará a la realidad, ya que el error de discretización será menor. Un ejemplo simple para visualizar esto es con ayuda de una función continua como en la Figura 27, la discretización en rojo tiene más elementos y por tanto se puede acercar más a la figura original.

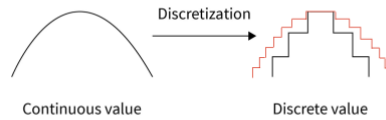


Figura 27 - Ejemplo de discretización

Por ende, es deseable el mayor número de celdas y el menor tamaño de estas para obtener el mejor resultado posible, con el inconveniente de que la cantidad de recursos informáticos y tiempo de procesamiento aumenta exponencialmente con ellos. Teniendo en cuenta que una malla hexaédrica, por ejemplo, un cubo, tiene 4 nodos (uno en cada esquina), si se parte la distancia entre nodos a la mitad para refinar la malla, obtendremos 8 cubos (Figura 28). Es decir, el número de celdas y por lo tanto el tiempo necesario para solucionar el caso, aumenta exponencialmente comparado con la precisión. Por ello se debe encontrar un equilibrio entre ambos.

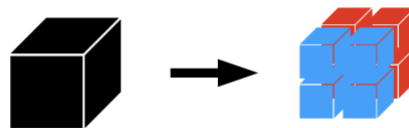


Figura 28 - Hexaedros

Como indicador de la calidad de la malla se usan 3 parámetros que muestra el programa al realizar un chequeo de la malla [36].

- *Max Skewness*: un buen resultado tiene un valor menor que 0.9, pero se permite llegar hasta 0.95. Muestra la asimetría de la celda.
- *Max Expansion Ratio*: debe ser menor que 10 pero un valor menor que 20 es aceptable. Indica la ratio máxima de expansión de dos celdas contiguas.
- *Max Aspect Ratio*: no hay valores fijos. Representa el valor máximo de las relaciones de aspecto, es decir, el largo de la celda entre su altura. No debe ser excesivamente grande, aunque depende de la aplicación.

Por lo general se busca una malla ordenada, sin cambios bruscos de tamaño de celdas ni celdas estiradas o amorfas. Por simple que parezca, una malla con buen aspecto visual suele ser también una buena malla para las simulaciones.

4.4.3 MODELOS VISCOSOS

El flujo turbulento está compuesto por estructuras no estacionarias llamadas vórtices (también denominadas ‘eddies’), que son patrones de estructura circular que se mueven a gran velocidad como un torbellino. Debido a la viscosidad del fluido, los torbellinos disipan energía por rozamiento entre las partículas del fluido. Los vórtices grandes son inestables y tienden a deshacerse en *eddies* más pequeños, que debido a su menor tamaño tienen una concentración de energía cinética por área mayor, lo que les permite mantener su estructura durante más tiempo. En definitiva, la energía que entra en un flujo se traspa de vórtices grandes a más pequeños hasta que se disipan totalmente como calor causado por el rozamiento [36].

Para simular un flujo correctamente se deberían tener en cuenta hasta los *eddies* de menor tamaño y para ello la malla debería ser lo suficientemente fina como para poder apreciarlos. No obstante, generalmente estos son demasiado pequeños para influenciar el resultado de manera apreciable, además de que, como ya se ha discutido en el apartado anterior, una malla demasiado refinada es costosa de simular. Por lo tanto, se deben tomar ciertas libertades de forma razonada para aproximar el resultado mediante modelos y simplificaciones, según el tiempo y los medios disponibles y la precisión de los resultados exigida. Citando a George Edward Pelham Box: “todos los modelos son erróneos, pero algunos son útiles”, por lo que saber en qué situaciones se pueden usar que modelos es la clave para una simulación fiable.

4.4.3.1 Tipos de simulación

Los diferentes métodos se pueden diferenciar entre los que no aproximan mediante modelos y los que sí, de estos últimos hay varias categorías según su precisión [32].

Sin modelos:

- DNS: *Direct Numerical Simulation* (simulación directa de turbulencia), no se emplea ningún tipo de modelo y se simula hasta los vórtices más pequeños que reconoce la malla. Es el método más exigente y costoso, pero también el más preciso y exhaustivo.

Con modelos:

- LES: *Large Eddy Simulation* (simulación de grandes escalas), los *eddies* más pequeños son modelados mientras que los más grandes son calculados numéricamente. El límite se encuentra en el tamaño de malla, todo lo que sea menor que la celda es modelado.
- RANS: *Reynolds averaged Navier-Stokes*, es el modelo más simple y que menos recursos necesita. El modelo RANS asume que la turbulencia es estacionaria y se caracteriza mediante el promedio de los campos de velocidad y presión en el tiempo, lo que reduce significativamente los requisitos computacionales.
- DES: *Detached Eddy Simulation* (simulación de los vórtices desprendidos), es una combinación entre RANS y LES. Las estructuras cercanas a cuerpos y las menores que el tamaño de la malla son simuladas con RANS y las demás son calculadas mediante LES. Esto combina los puntos fuertes de ambos procesos y suele ser el mejor compromiso.

Un resumen muy simplificado de esto se puede ver en la Figura 29:

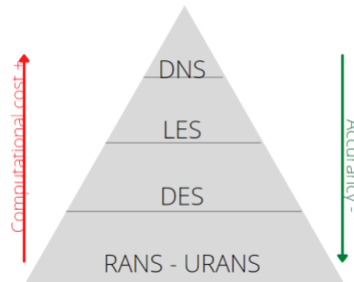


Figura 29 - Resumen de solucionadores [14]

Asimismo, en la Figura 30 se pueden ver los distintos modelos en acción y se reconoce claramente que el modelo RANS no es capaz de mostrar las estructuras del flujo y solo marca la media por zonas, el modelo LES muestra los vórtices de mayor tamaño y la simulación DNS llega a representar hasta las estructuras más pequeñas.

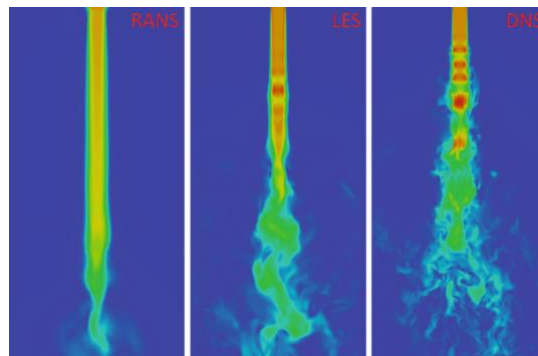


Figura 30 - Flujo simulado por distintos solucionadores [14]

4.4.3.2 Profundización en el modelo RANS

A pesar de ser el modelo más simplificado y alejado de la realidad, el modelo RANS es uno de los más utilizados en la industria, porque resulta efectivo en un gran número de casos, pero mantiene un tiempo de cálculo relativamente corto. No obstante, dentro de RANS se debe tomar la decisión de que tipo de modelo turbulento se desea. Como ya se ha explicado en el capítulo de teoría (4.3.1), las ecuaciones de Navier-Stokes no tienen solución numérica, por lo que para llegar a un resultado se deben introducir ecuaciones nuevas con variables

ficticias como la energía cinética turbulenta o la viscosidad turbulenta, que se añaden a las variables originalmente expuestas en el apartado de teoría y las ayudan a resolver. Las diferentes categorías de modelos turbulentos son las siguientes [32]:

- 0 ecuaciones: modelo turbulento algebraico, no añade ecuaciones turbulentas de transporte adicionales. Es demasiado simple y está obsoleto, así que hoy en día no se utiliza.
- 1 ecuación: añade una ecuación de transporte, generalmente la de energía cinética turbulenta o para la viscosidad turbulenta. El modelo original es la ecuación de Prandtl y el más comúnmente utilizado es el modelo Spalart-Allmaras.
- 2 ecuaciones: es el tipo de modelo turbulento más usado en la industria. Añade dos ecuaciones de transporte adicionales que permite que la simulación tenga memoria y pueda tener en cuenta los efectos históricos de disipación y convección durante la simulación. La primera variable de transporte más común es la energía cinética turbulenta k , y la segunda suele ser la disipación turbulenta ε o la velocidad específica de disipación turbulenta ω . Así, k dicta la cantidad de energía en las estructuras turbulentas y ε o ω determinan la duración temporal o espacial de la turbulencia. Las combinaciones de estas variables resultan en los modelos k-epsilon y k-omega.
- RSM: las ecuaciones de esfuerzo de Reynolds son resueltas directamente y obtiene el tensor de esfuerzo de Reynolds directamente, sin calcular la viscosidad turbulenta. Es un método muy complejo y con varias ecuaciones adicionales pero que en casos extremos con condiciones de flujo poco habituales es superior a los demás.

En adición al modelo RANS, se pueden usar *wall functions*, que usan datos empíricos bajo condiciones conocidas para ahorrar recursos computacionales, ya que en algunos casos el comportamiento del flujo es predecible. Esta opción puede modelar con mucha exactitud el desarrollo de la capa límite pegada a los cuerpos. Gracias a esto, se puede escoger manualmente el número de celdas inmediatas a los cuerpos y estas serán modeladas en vez de simuladas, lo cual agiliza la computación.

Capítulo 5. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

Este capítulo justifica la decisión de realizar este proyecto y expone los objetivos que busca alcanzar y la metodología que se emplea para lograrlos.

5.1 JUSTIFICACIÓN

En los capítulos anteriores se ha hablado extensamente sobre los beneficios que se esperan de este proyecto en cuanto al medio ambiente. Siendo uno de los temas más discutidos tanto en la sociedad como en la política, reducir la contaminación y mejorar la calidad del aire es primordial y una necesidad para un futuro sostenible. Además, se ha comentado también la utilidad para los conductores de estos vehículos, ya que gastarán menos dinero en gasolina al consumir menos y posiblemente tendrán una experiencia más cómoda debido a la reducción de ruido generado por el aire turbulento alrededor del coche.

Sin embargo, los retrovisores de cámara también son deseables desde el punto de vista de los fabricantes de coches. Para empezar, como se ha comentado anteriormente, el diseño de vehículos en las últimas décadas se ha guiado principalmente por la búsqueda de eficiencia aerodinámica para lograr menos resistencia al aire y más autonomía del vehículo. Este punto suele ser un dato clave cuando un comprador se decanta por un vehículo, porque buscan los máximos kilómetros por litro de combustible posibles. Por ende, un coche más eficiente significa un coche más atractivo para el comprador común y, por lo tanto, un mayor volumen de ventas y beneficio económico para la empresa. Actualmente se está investigando en varias áreas de la carrocería para mejorar los vehículos aerodinámicamente y buscar alternativas a los retrovisores de espejo parece ser el siguiente paso adelante.

Asimismo, el futuro de la industria automotriz está claramente en los coches de conducción autónoma con marcas como Tesla, Google y Apple invirtiendo muchos recursos en refinar esta tecnología hasta el punto de ser infalible. Como la conducción autónoma requiere un

gran número de sensores y cámaras, tener ya un diseño para retrovisores con estas tecnologías supone pavimentar el camino hacia su implementación y expansión.

En conclusión, es evidente que el futuro va a requerir innovaciones en el ámbito de estos retrovisores y el trabajo realizado en este texto puede ayudar a los diseñadores de los automóviles a tomar decisiones acerca de la viabilidad de estas alternativas.

5.2 OBJETIVOS

En este trabajo de fin de grado los objetivos están directamente relacionados con las ODS mencionadas en el primer capítulo, ya que se pretende principalmente buscar una solución que ayude a disminuir la producción de CO₂ causada por los automóviles para reducir así la contaminación del aire y la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Para ello, se pretende cuantificar el efecto sobre el consumo de combustible en el caso de que todos los vehículos tuviesen retrovisores de cámara y valorar si el impacto es suficientemente grande como para merecer un cambio de ley o apoyos económicos por parte del gobierno para impulsar esta tecnología.

En un segundo plano, se busca comparar el efecto de este cambio con otras modificaciones posibles como cortinas de aire o fondos planos en los coches y con otras pérdidas en el coche (bajar las ventanillas, ruedas desinfladas etc.) para poner en contexto los resultados obtenidos.

Por último, se busca justificar las simplificaciones realizadas y comprobar que los valores obtenidos entran dentro de los márgenes que se podrían esperar en la realidad para así poder determinar si los resultados son fiables y pueden ser usados para tomar una decisión acerca de si esta tecnología merece la pena.

5.3 METODOLOGÍA

Como base teórica del proyecto se establece una relación entre la fuerza de arrastre que experimenta un vehículo y el respectivo consumo de combustible. Dicho consumo está directamente relacionado con la producción de CO₂, tal y como se ha explicado en el capítulo 4.2.

Para obtener los valores de la fuerza de arrastre para cada modelo se simulan mediante un programa CFD. Como ya se ha mencionado anteriormente, en este proyecto se usará ANSYS, por lo que el primer paso es familiarizarse con este programa, en especial con los apartados Design Modeler y Spaceclaim para diseñar el cuerpo y Fluent para realizar el mallado, simularlo y analizar los resultados. Habiendo adquirido esta experiencia, se puede proceder con el proyecto y el uso del Software sin demasiadas interrupciones.

En cuanto al modelo del vehículo en cuestión, se extruye desde cero en Design Modeler basándose en un turismo tipo hatchback genérico y posteriormente se refina en Spaceclaim. El uso de modelos bajados desde páginas web como Grabcad se ha descartado debido al alto número de errores que presentan y que no merece la pena arreglar, debido a que las herramientas comunes de los Softwares mencionados no son capaces de solucionarlos. Además, se tendrían que simplificar mucho los modelos, ya que el bajo número de celdas permitidas por la licencia de estudiante no permite el uso generoso de refinamientos en áreas que no son claves para obtener los resultados del proyecto y detalles en el morro del vehículo o las ventanillas son irrelevantes.

Como se desean comparar distintos tipos de retrovisores, se crean tres versiones a partir del modelo genérico: uno con retrovisores tradicionales y dos con distintos diseños de cámaras, basados en los que se han visto en prototipos y coches en producción.

Por ende, se tienen tres cuerpos que se simulan siguiendo el mismo proceso:

Primero, se crea un dominio computacional alrededor del vehículo que es donde el programa lleva a cabo las simulaciones. A continuación, se construye la malla en dicho dominio,

teniendo en cuenta refinamientos en zonas clave y se simula con los ajustes que se describirán en el Capítulo 6. Después de valorar si la calidad de la malla y de la convergencia de la simulación es aceptable, se obtienen como resultado las fuerzas de arrastre respectivas a cada modelo.

Segundo, se procede a convertir las diferencias entre fuerzas de arrastre en ahorro de consumo de combustible y producción de CO₂ según la teoría expuesta en el capítulo 4.2.

Por último, se comparan los valores y se comprueba si la mejoría es significativa y tan importante como para que la industria del automóvil vaya en esa dirección. Además, se deben considerar los efectos sobre el flujo turbulento alrededor del cuerpo para ver si no se generan estructuras indeseadas que puedan transmitir vibraciones y ruidos al interior del vehículo a través de las ventanillas.

Capítulo 6. SETUP DEL PROGRAMA Y SIMULACIONES

En este capítulo se presentarán los distintos modelos que se van a usar y el proceso de simulación, es decir, los ajustes para el mallado y solución de los casos. De esta forma, se justificarán las decisiones tomadas para cada ajuste para así en el capítulo 7 pasar a analizar los resultados obtenidos.

6.1 MODELOS

Para poder analizar la diferencia entre un retrovisor tradicional y los de cámara se ha generado un modelo en Design Modeler y Spaceclaim basado en el contorno del coche de estilo hatchback “DrivAer”, creado por la TU de Múnich en colaboración con Audi y BMW [37]. Debido al límite de celdas impuesto por la licencia de estudiante, el modelo no puede tener gran detalle porque la malla no se va a poder adaptar a cada pequeño orificio o relieve. Así, interesa tener un modelo que represente la geometría general del vehículo para que los resultados puedan ser útiles y extrapolables a la vida real. Para ello, se ha extruido el perfil del coche y se ha prestado especial detalle a las zonas del capó, la luna y la esquina entre la luna y las ventanillas, ya que afectarán al flujo que incidirá sobre los retrovisores (Figura 31 a 32). Como la geometría es simétrica respecto al plano xz (Figura 31), el flujo será simétrico también. A causa de esto, es práctica común simular solo la mitad del coche y añadir en dicho plano la condición de simetría, lo cual se detallará más adelante. De esta forma se ahorran celdas y tiempo computacional valioso y se concentran en una mitad, agilizando el proceso e incluso mejorando la precisión.

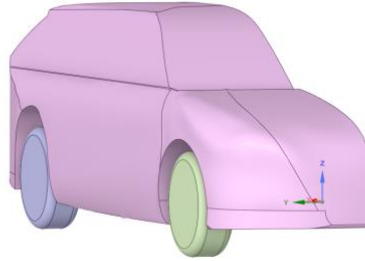


Figura 31 - Geometría base

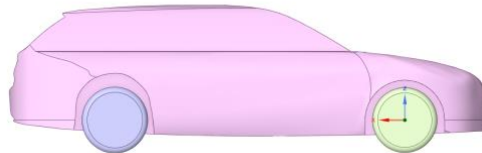


Figura 32 - Geometría base, vista lateral

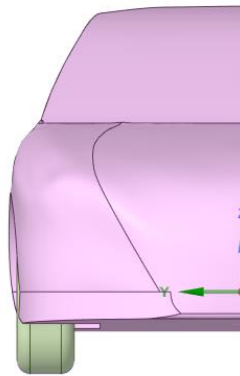


Figura 33 - Geometría base, vista frontal

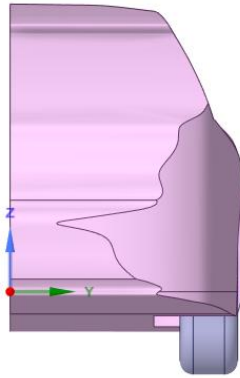


Figura 34 - Geometría base, vista trasera

A partir del modelo base se crean 3 versiones:

6.1.1 MODELO CON RETROVISOR TRADICIONAL

El primero será el retrovisor tradicional, el cual se ha basado en la geometría de un Nissan Qashqai del año 2008 (Figura 35), que es mi coche familiar y tiene una geometría parecida al modelo que se va a simular. Los retrovisores son relativamente grandes y están separados de la carrocería, tal y como se ha comentado en el apartado 3.2 sobre la evolución de estos (Figura 36 a 36). Asimismo, tienen una forma casi piramidal pero redondeada, donde la parte delantera tiene pico para cortar mejor el aire.



Figura 35 - Nissan Qashqai [38]

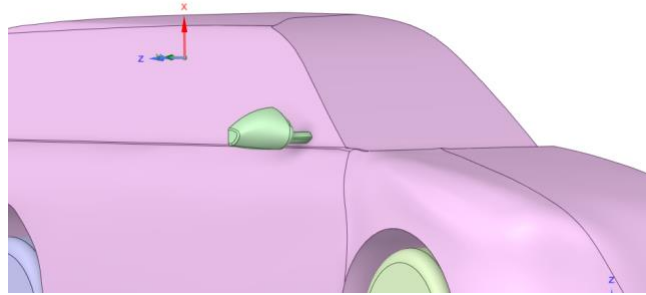


Figura 36 - Retrovisor tradicional, vista 1

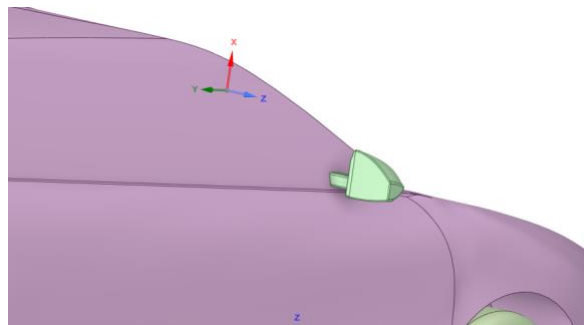


Figura 37 - Retrovisor tradicional, vista 2

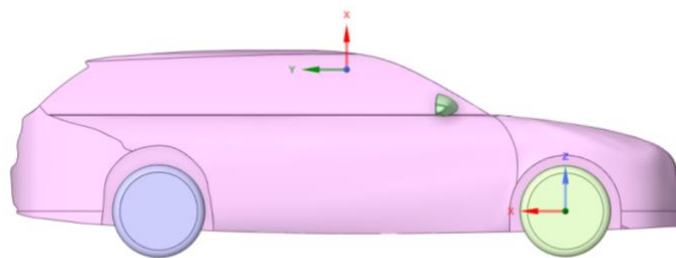


Figura 38 - Retrovisor tradicional, vista lateral

6.1.2 MODELOS CON RETROVISORES CON CÁMARA

De los retrovisores con cámara se analizarán dos versiones distintas. La primera está basada en el VW LX1 (Figura 39) y en el Honda e Advance (Figura 5) previamente mencionado. En estos coches, la cámara se encuentra en una pequeña protuberancia en la puerta del vehículo (Figura 40 a 40). Además, se ha añadido una geometría sobresaliente en la parte inferior, simulando las cámaras que ayudan durante el aparcado y, en la parte posterior, un área plana que es donde se colocaría la cámara.



Figura 39 - VW LX1 [39]

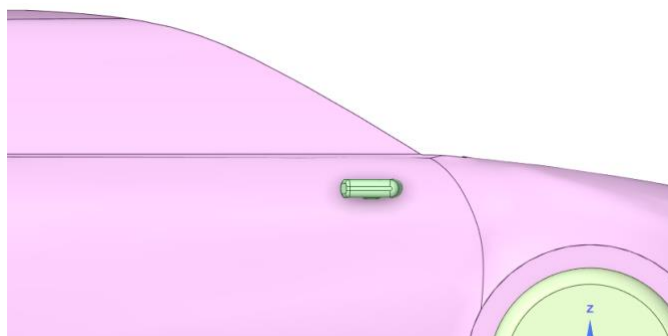


Figura 40 - Retrovisor con cámara 1, vista lateral

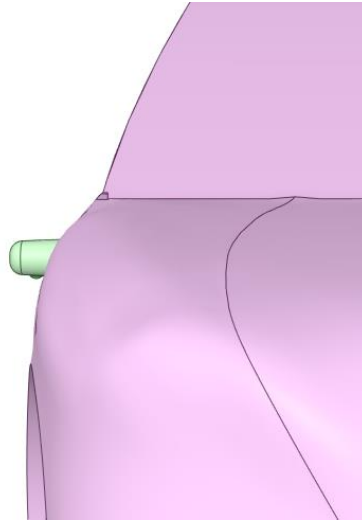


Figura 41 - Retrovisor con cámara 1, vista frontal

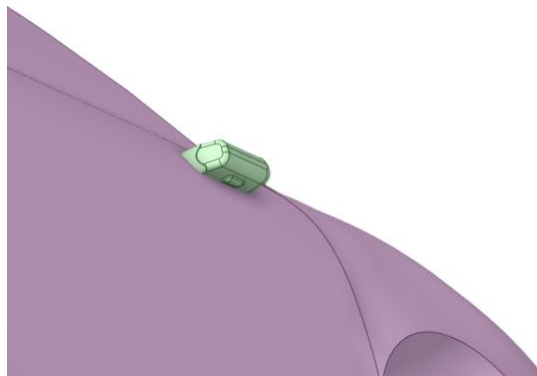


Figura 42 - Retrovisor con cámara 1, vista inferior

La otra versión está basada en el Honda e: N2 concept (Figura 43) y se trata de una geometría parecida a un retrovisor tradicional, pero de mucho menor tamaño y con una forma más aerodinámica (Figura 44 a 45). Como el puente entre el retrovisor y el chasis debe aguantar

menos peso, se puede diseñar más fino y con perfil de ala que ayudará a evitar la separación del flujo.



Figura 43 - Honda e: N2 concept [40]

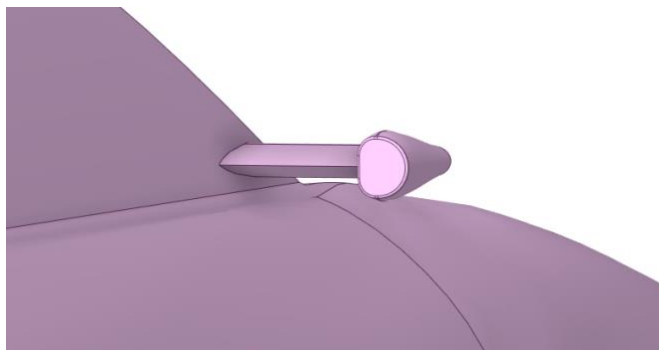


Figura 44 - Retrovisor con cámara 2, vista 1

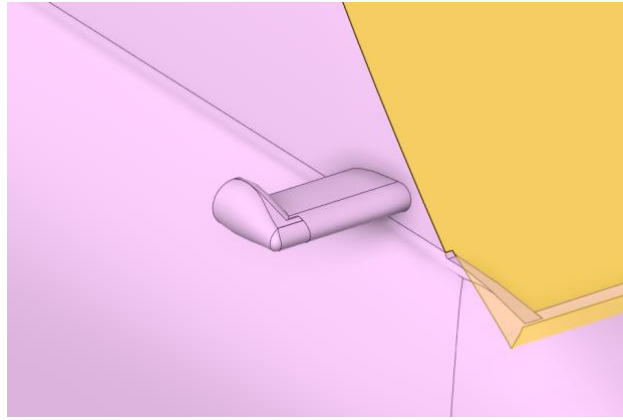


Figura 45 - Retrovisor con cámara 2, vista 2

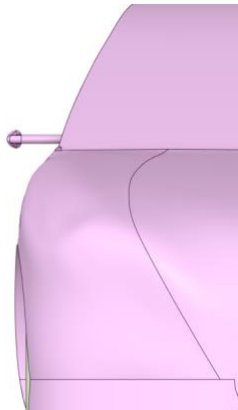


Figura 46 - Retrovisor con cámara 2, vista frontal

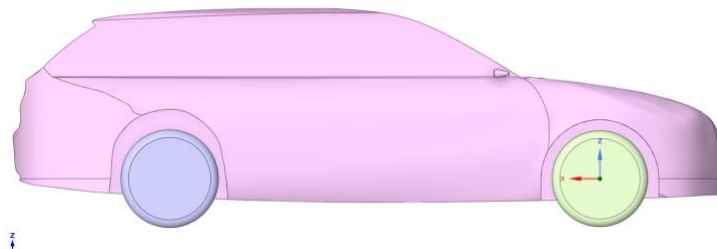


Figura 47 - Retrovisor con cámara 2, vista lateral

6.2 AJUSTES DEL MALLADO

6.2.1 DOMINIO COMPUTACIONAL Y REFINAMIENTOS

6.2.1.1 Dominio computacional

Antes de proceder con el mallado en Fluent se debe crear un dominio computacional en Spaceclaim. Se trata de un volumen al que se le sustrae la geometría del coche y que servirá para indicarle al programa dónde debe crear la malla y, posteriormente, solucionar el caso. Se asemeja a un ‘túnel de viento virtual’ donde se pueden ajustar las condiciones según se desee.

En primer lugar, el tamaño de dicho dominio computacional depende de las dimensiones del cuerpo que se desea analizar. Por norma general, es aconsejable dejar un margen de dos veces la altura del cuerpo aguas arriba, diez veces aguas abajo y cinco veces por encima de la geometría. En cuanto a la anchura del volumen, debe ser diez veces el ancho del cuerpo. Por lo tanto, como el coche que se desea analizar tiene unas dimensiones de un metro y medio de alto y 0,9 metros de ancho (solo una mitad del vehículo), el dominio computacional debería dejar un margen de tres metros aguas arriba, quince metros aguas abajo, tener siete metros de alto y nueve metros de ancho [41]. Debido al limitado número de celdas disponibles por la licencia de estudiante, se ha preferido acortar el volumen para ahorrar así unas celdas en regiones que no tendrán gradientes de presión excesivamente altos y poder aumentar la precisión mediante refinamientos en zonas claves, tal y como se describirá en el próximo apartado. En definitiva, se ha acortado el espacio aguas arriba a 2,5 metros y a catorce metros aguas abajo.

El volumen del dominio computacional quedaría de la siguiente forma (Figura 48):

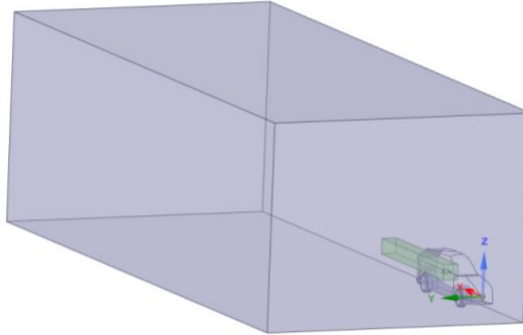


Figura 48 - Dominio computacional, vista isométrica



Figura 49 - Dominio computacional, vista lateral

La intersección entre las ruedas y el suelo del dominio suele crear unas áreas demasiado finas que la malla no es capaz de ocupar correctamente, lo cual suele causar unas celdas con formas indeseables. Para evitar esto, es común generar un redondeo entre ambas caras, en este caso se ha escogido un radio de 3mm para solucionar el problema (Figura 50).

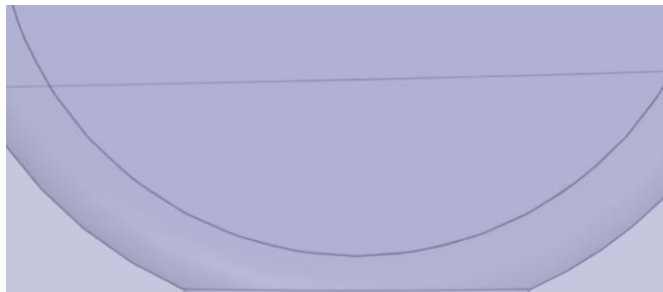


Figura 50 - Redondeo entre la rueda y el suelo

6.2.1.2 Refinamiento

Este trabajo busca comparar las diferencias en el flujo alrededor de distintos tipos de retrovisores, por lo que resulta vital que esa zona cerca del vehículo tenga una malla lo suficientemente fina como para simular correctamente el comportamiento de la capa límite y su separación, así como los gradientes de presión. A raíz de esto, se introduce un cuerpo de dimensiones 0,5x0,5x5m (Figura 51) que servirá como cuerpo de influencia (BOI por sus siglas en inglés) a la hora de crear la malla, es decir, se le instruirá al programa que ese volumen debe contener una malla más fina que el resto, los valores exactos se describirán más adelante.

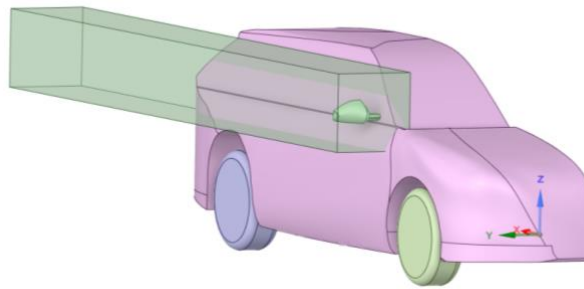


Figura 51 - BOI vista 1

También es muy importante dejar que el refinamiento continúe a lo largo del coche, como se puede apreciar en la Figura 52, para que los vórtices en la estela del retrovisor y su comportamiento al contactar con la carrocería se simule con suficiente detalle.

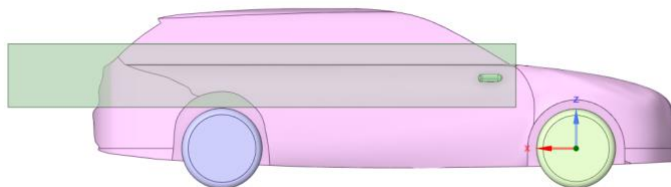


Figura 52 - BOI vista lateral

6.2.2 CONFIGURACIÓN DE LA MALLA

Los valores escogidos para los parámetros de la malla son idénticos en los tres modelos, por lo que la siguiente descripción se aplica a todos ellos.

En primer lugar, el generador de mallas tiene la siguiente interfaz (Figura 53):

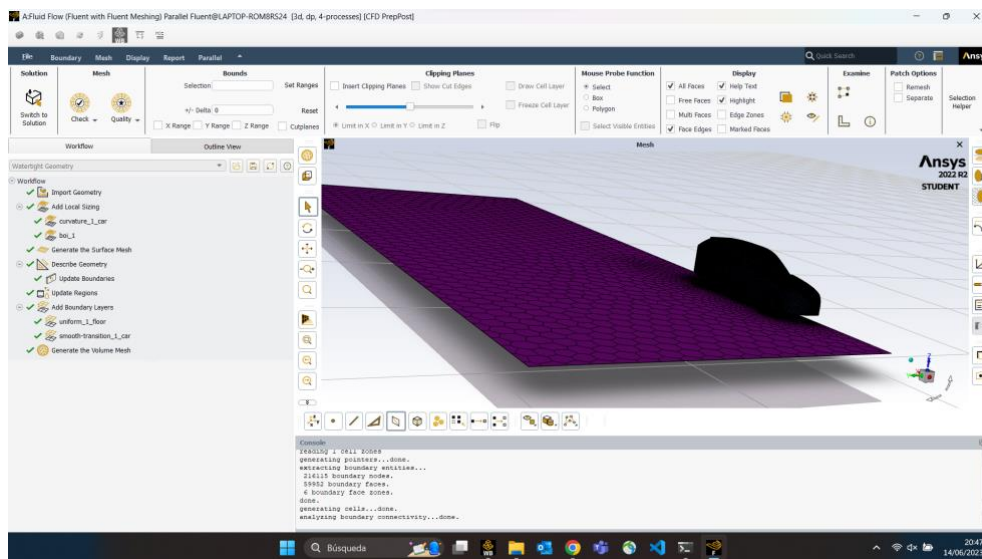


Figura 53 - Generador de mallas de Fluent

Los pasos a seguir se encuentran en el recuadro de la derecha y los más importantes son los siguientes: *local sizing*, *surface mesh*, *boundary layers* y *volume mesh*. En los pasos intermedios de descripción de geometría únicamente hay que indicar que tipo de pared es cada cara, es decir, si es una pared sólida, un plano de simetría o entrada de flujo, etc. No obstante, esto se puede cambiar en el apartado del solucionador donde habrá que introducir todas las condiciones de contorno, por lo que no se entrará en detalle en este momento.

6.2.2.1 Local sizing

La función de *local sizing* permite elegir un tamaño específico en una región determinada. En esta simulación se van a utilizar dos tipos distintos:

La primera es un *local sizing* en las caras del vehículo que varía según la curvatura de la geometría. Así, en las zonas más complejas geométricamente, que es donde suelen aparecer

los gradientes de presión y comportamientos de flujo más importantes, habrá una malla más fina. El tamaño más pequeño de celda se ha acotado a 6mm y el más grande a 25mm. Además, la ratio de crecimiento que indica cuanto puede variar el tamaño de celdas contiguas se ha mantenido en el valor predeterminado que es 1,2.



Figura 54 - Malla del vehículo

En la Figura 54 se puede apreciar claramente como hay un mayor número de celdas y de menor tamaño en las zonas con complejas del vehículo. Algunas de las zonas más importantes son la parte trasera del techo, para simular bien la separación del flujo y la parte inferior del morro, donde puede haber pérdidas en la entrada a los bajos del vehículo. Gracias a la función de curvatura se ha logrado refinar este tipo de regiones fácilmente y sin necesidad de crear manualmente geometrías de referencia.

El segundo uso del *local sizing* se realiza en el cuerpo de influencia mencionado en el apartado 6.2.1.2. Dentro de este volumen todas las celdas tendrán un tamaño máximo de 40mm y en los bordes su transición al tamaño del resto de la malla será nuevamente con la misma ratio que antes de 1,2.

Una vez realizado el mallado volumétrico y realizando un corte a lo largo del vehículo, por donde se encuentra dicho cuerpo de influencia, se obtiene la siguiente Figura 55:

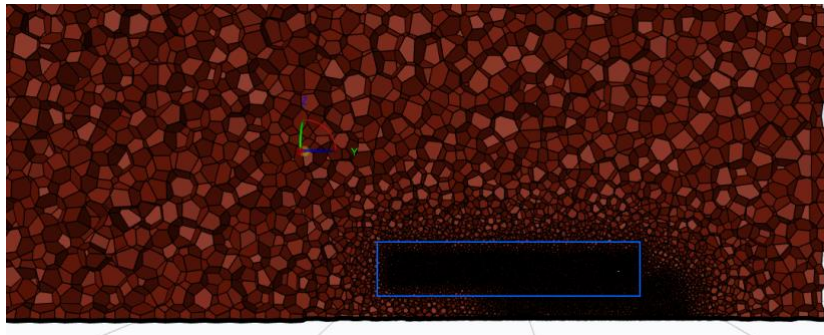


Figura 55 - Corte en la malla

A pesar de que debido a la distancia no se pueden apreciar las celdas individuales, se puede reconocer que la malla es muy fina en el contorno del octaedro utilizado como BOI, que está resaltado por el rectángulo azul.

6.2.2.2 Surface mesh

El siguiente paso del mallado es la malla superficial. Esta se generará en todas las caras y servirá como guía al mallado volumétrico que se realizará posteriormente. Se escoge la función de tamaño de curvatura y proximidad que al igual que se ha explicado en el apartado anterior, cubrirá con más celdas las regiones curvas o que estén próximas entre sí. Los valores de los parámetros serán los siguientes (Figura 56):

Generate the Surface Mesh	
Minimum Size [m]	0.01
Maximum Size [m]	0.5
Growth Rate	1.2
Size Functions	Curvature & Proximity
Curvature Normal Angle [deg]	18
Cells Per Gap	3
Scope Proximity To	edges
<input checked="" type="checkbox"/> Draw Size Boxes	
Separate Out Boundary Zones by Angle?	No
<input type="checkbox"/> Advanced Options	
<input type="button" value="Generate the Surface Mesh"/> <input type="button" value="Edit"/> <input type="button" value="Clear Preview"/> <input type="button" value="..."/>	

Figura 56 - Valores del mallado superficial

El parámetro de *cells per-gap* se refiere al número máximo de celdas que habrá en los espacios pequeños entre cuerpos, como en este modelo no se tienen geometrías excesivamente pequeñas y cercanas este parámetro no tiene un efecto demasiado grande sobre el mallado.

En definitiva, lejos del cuerpo las celdas pueden ser de mayor tamaño, ya que los gradientes de presión serán menos pronunciados, pero cerca del vehículo se necesita una mayor precisión, tal y como se puede reconocer en la Figura 57.

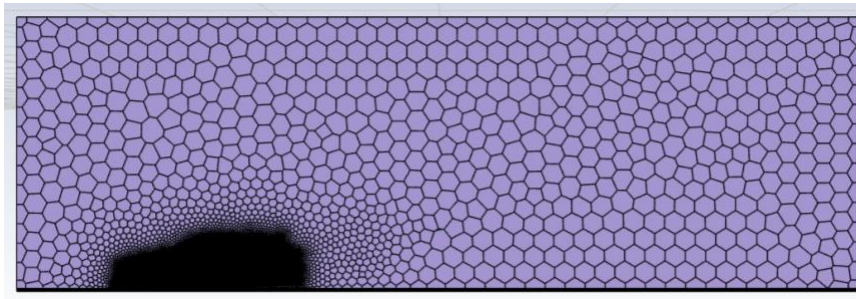


Figura 57 - Malla superficial

6.2.2.3 Boundary layers

Boundary layers, en español capas límite, es una función para que el programa incorpore celdas octaédricas, paralelas a una superficie, lo que ayuda a la correcta simulación del crecimiento de la capa límite explicada en el apartado 4.3.3. Esta zona del flujo es muy importante porque determina el punto en el que se separará de un cuerpo y como transiciona de laminar a turbulento, por lo que es vital incorporar esta función para el cálculo de *drag* y presiones. Las dos caras en las que se va a implementar son el coche y el suelo, ambas con 5 capas de celdas de este tipo, antes de pasar a la malla general del resto del dominio con la ratio de crecimiento habitual de 1,2.

En el caso del suelo se escogerá una capa límite uniforme con un tamaño de 10mm en la primera celda, es decir, la que está pegada al cuerpo. Como más adelante se explicará, se

establecerá el suelo como un cuerpo en movimiento, a la misma velocidad que el flujo, por lo que no se va a desarrollar una capa límite excesivamente alta o importante.

En cambio, sí que interesa conocer con detalle su comportamiento entorno al coche estacionario contra el que va a fluir el aire. Por ello, se escoge el tipo *smooth transition* que se adapta al tamaño de celdas ya especificado en el refinamiento superficial por curvatura de las caras del vehículo, gracias a lo cual la malla de la capa límite será también muy fina.

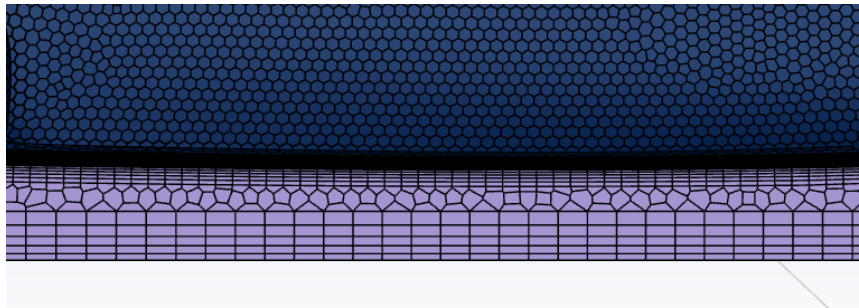


Figura 58 - Malla de las capas límite

En la Figura 58 se pueden observar ambas funciones en la región entre los bajos del vehículo y el suelo. Se reconoce que las celdas del suelo son más grandes que las del contorno del vehículo y entremedias las celdas poliédricas de la malla general.

6.2.2.4 Volumetric Mesh

Por último, se introducen los parámetros de la malla volumétrica, un tamaño máximo de celda de 600mm y se escoge la geometría poliédrica para el mallado. Siguiendo las conclusiones del apartado 4.4.2, este tipo de forma es un buen compromiso entre precisión, simplicidad y eficiencia a la hora de llenar el volumen.

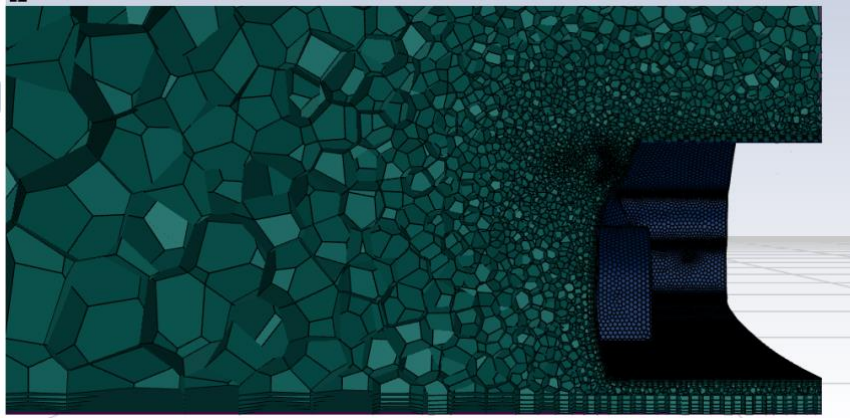


Figura 59 - Corte transversal de la malla

La Figura 59 resume todo lo anteriormente mencionado sobre la malla en una imagen de un corte transversal de la malla volumétrica a la altura del retrovisor. Lejos del vehículo las celdas son mucho más grandes comparadas con las que se encuentran alrededor del cuerpo y en la región del retrovisor se aprecia el refinamiento del cuerpo de influencia. Asimismo, se reconocen las capas límite del suelo y de las caras del vehículo.

6.2.2.5 Análisis de la malla

En el apartado 4.4.2 se introdujeron los parámetros de *max skewness*, *max expansión ratio* y *max aspecto ratio* para evaluar la calidad de la malla. En este caso, probablemente debido a que se ha utilizado una capa límite de altura uniforme en el suelo que colinda con la malla volumétrica, la cual lejos del vehículo tiene elementos de gran tamaño, la ratio de expansión máximo está muy por encima de los límites aceptables. Por lo tanto, este parámetro no se debe usar para juzgar la calidad del mallado.

En la Tabla 3 se recogen los valores característicos del mallado para evaluarla. En los tres casos las cifras de *max skewness* están dentro de los límites aceptables y el *max aspect ratio* no es descabellado. En definitiva, la malla cumple los requisitos de calidad necesaria y, además, no se encuentran fallos aparentes al examinarla visualmente.

<i>Tipo de retrovisor:</i>	<i>Tradicional</i>	<i>Cámara versión 1</i>	<i>Cámara versión 2</i>
Número de celdas:	473.939	460.001	458.739
Max Skewness:	0,924	0,923	0,934
Max Aspect Ratio	197	117	74,83

Tabla 3 - Características de la malla

Para concluir, se debe reiterar que el número de celdas en estas simulaciones es excesivamente bajo debido al límite impuesto por la licencia de estudiante. En un entorno de investigación profesional con un equipo informático más potente el número de celdas ascendería más allá del orden de los millones para poder empezar a ser fiable. De esta forma se podrían introducir más capas de celdas en las capas límite y generar una malla más fina en general. No obstante, el procedimiento sería similar al realizado en este trabajo, con refinamientos por curvatura y por volumen de influencia en las regiones a analizar y capas límite en el coche y en el suelo, solo que con tamaños de celda considerablemente menores en todos los ámbitos.

6.3 CONFIGURACIÓN DEL SOLUCIONADOR

Al igual que para la configuración de la malla, todos los ajustes del solucionador serán idénticos en los tres casos. Una vez abierto el solucionador de Fluent, el recuadro de la izquierda indica los pasos a seguir para ajustar la simulación (Figura 60). Se simulará únicamente a la velocidad máxima permitida en España de 120km/h, debido a que como se ha comentado ya varias veces, los efectos de la aerodinámica sobre un vehículo son más relevantes a altas velocidades y los beneficios de un diseño eficiente son más pronunciados. Por ende, si se busca una mejora aerodinámica, esta debe ser encontrada a 120km/h.

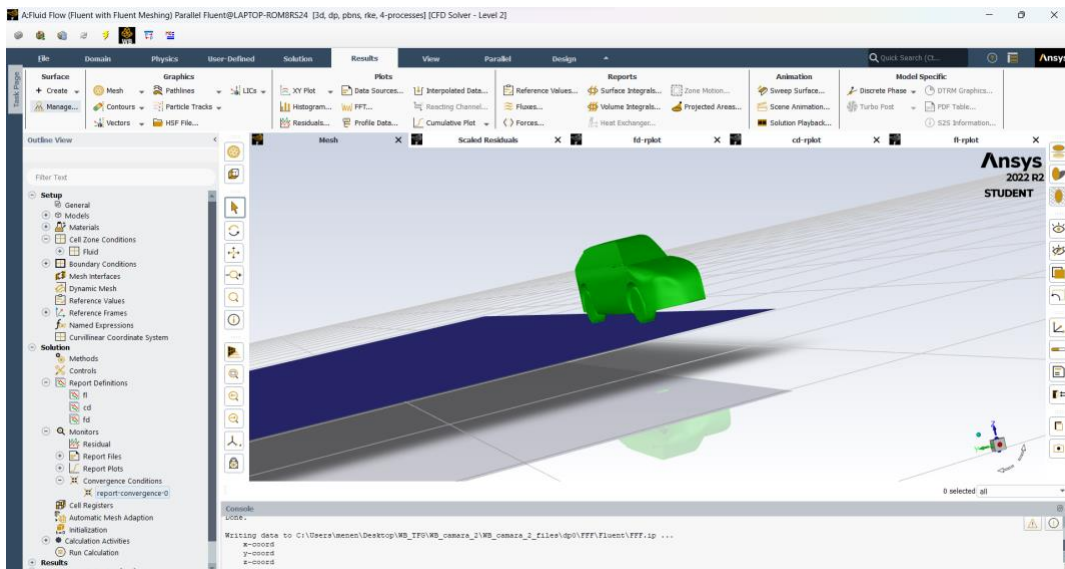


Figura 60 - Interfaz del solucionador Fluent

6.3.1 SETUP

En primer lugar, se dejan los ajustes predeterminados de solucionador basado en presión, que es la opción más común para este tipo de problemas, y tiempo estacionario, debido a que las condiciones del caso no varían en el tiempo. Asimismo, se añade la gravedad en la dirección -z según la orientación del modelo.

El segundo paso es elegir el tipo de modelo viscoso que se debe aplicar. Tal y como se ha expuesto en el apartado 4.4.3.2, el modelo RANS k-epsilon, de 2 ecuaciones de transporte añadidas, es el más común en la industria. Tiene una fácil convergencia y una precisión adecuada para flujos externos alrededor de cuerpos, si no hay gradientes de presión extremadamente altos, como la salida de gases de un cohete [44]. Se escoge pues el modelo k-epsilon realizable, que es una evolución de la versión standard y computa mejor las capas límites bajo gradientes de presión adversos a costa de ser ligeramente más complejo [42]. Este modelo exige la implementación de las previamente mencionadas *wall functions*, de las cuales se utilizarán las *Non-Equilibrium wall functions*, porque es la más adecuada para el cálculo de separación de flujos [43] e interesa modelar este fenómeno correctamente debido a su efecto sobre la estela y, por lo tanto, sobre el *drag*.

A continuación, se introducen las condiciones de contorno.

- En la entrada *inlet*, se introduce la velocidad del flujo en dirección x de valor 33.33m/s, es decir, 120km/h y se reduce la intensidad turbulenta y la ratio de viscosidad turbulenta a 1% y 2 respectivamente.
- La salida *outlet* se mantiene con los valores predeterminados que simulan una salida a presión ambiental.
- El coche será un *wall*, es decir, una pared estacionaria y con condición no-slip, por lo que se desarrollará una capa límite en su entorno, como se ha explicado anteriormente en el apartado 4.3.3.
- Las paredes del dominio se tomarán como paredes sin esfuerzo cortante, especificando un valor nulo como condición, para que influyan lo menos posible en el desarrollo del flujo, ya que en realidad queremos simular el coche en un flujo libre, no constreñido por un túnel.
- El suelo se establecerá también como una pared, esta vez en movimiento para simular la carretera moviéndose bajo el vehículo, así que tendrá una translación en dirección x a la misma velocidad del flujo de aire.

Por último, en la pestaña de resultados, se proyecta el área del vehículo en dirección x redondeando hasta la cuarta posición detrás de la coma para obtener así el valor que utilizará el programa para calcular los coeficientes aerodinámicos de la ecuación E. 3 - *Drag*. Los valores de dichas áreas son $1,0679\text{m}^2$ para el retrovisor tradicional, $1,0455\text{m}^2$ para el modelo con cámara 1 y $1,0464\text{m}^2$ para el segundo modelo con cámara. Estos valores se introducen en el apartado de valores de referencia (Figura 60). En la anteriormente mencionada ecuación también aparece la velocidad, por lo que se debe añadir de la misma forma la velocidad del flujo de $33,33\text{m/s}$.

6.3.2 SOLUTION

En cuanto a los ajustes de la solución, se aplica el esquema *Coupled*, que soluciona la velocidad y la presión conjuntamente, porque están relacionadas. Para la discretización espacial la opción de *Least squared cell based* minimiza el error al realizar el cálculo a partir de los valores de una celda predecesora y en el resto de las variables se selecciona el método de *Second Order Upwind* que tiene en cuenta 3 puntos de datos a la hora de discretizar, en vez de solo dos en el *First Order Upwind*, por lo que tiene una mayor precisión.

Ahora, se deben introducir los factores de relajación, que indican cuánto puede cambiar un valor en cada iteración. Si son demasiado altos, la solución puede variar en exceso entre iteraciones y divergir, pero si son demasiado bajos la simulación puede tardar excesivamente en converger. Realizando simulaciones de prueba se reconoce que los resultados oscilan considerablemente entre iteraciones y no llegan a estabilizarse, así que para lograr una mejor convergencia se reducen los factores de relajación de la presión y el momento a 0,25 y el de la viscosidad turbulencia a 0,98.

En la sección de *reports* se crean las variables de fuerza de *drag* y *lift* (F_d , F_l) y del coeficiente de *drag* (c_d), que se investigarán más tarde. Es de vital importancia comprobar que el valor de la fuerza de arrastre se ha estabilizado al terminar la simulación, por lo que se observará su gráfica a la hora de determinar la validez de la convergencia. Para ello, en la sección de

condiciones de convergencia (Figura 60), se añade la condición de que F_d se haya mantenido en un rango de variación de 0,001 durante 15 iteraciones, lo cual indicará que el valor es definitivo.

Por último, se inicializa la solución de forma híbrida, que computa 10 iteraciones de un modelo simplificado para encarrilar el proceso de simulación y acto seguido se deja correr durante 500 iteraciones con los ajustes predeterminados.

6.4 ANÁLISIS DE LA CONVERGENCIA

La medida fundamental para comprobar la convergencia de un caso son los residuales, que cuantifican directamente el error en la solución de las ecuaciones de fluidos que son resueltas en cada nudo y cada iteración. Debido a la naturaleza iterativa del proceso, los residuales nunca podrán ser nulos, por lo que cuanto más bajos sean los valores, mayor será la precisión numérica. Habitualmente se monitorizan los residuales de las velocidades en las direcciones x, y, z, de las variables k y épsilon y la de continuidad de flujo másico. Por lo general, se busca que todos los residuales se encuentren por debajo del umbral de 10^{-6} .

Hay que tener en cuenta que una malla gruesa, como la que se utiliza en este trabajo, reduce considerablemente la precisión máxima obtenible, por lo que por mucho tiempo que se deje corriendo la simulación no se podrán alcanzar siempre los umbrales deseados. A causa de esto, unos valores aceptables para los residuales en estos casos son por lo menos 10^{-6} para las velocidades, 10^{-3} para las variables del modelo y 10^{-1} para la continuidad.

En la Figura 61 se presentan las gráficas que trazan la evolución de los residuales a lo largo de las iteraciones según el tipo de retrovisor simulado. En las tres gráficas se aprecia que entorno a la iteración 300 la solución se ha estabilizado y solo oscila levemente. Cada residual se encuentra holgadamente por debajo de los umbrales establecidos en el párrafo anterior, así que se puede decir que el error es asumible y la convergencia aceptable.

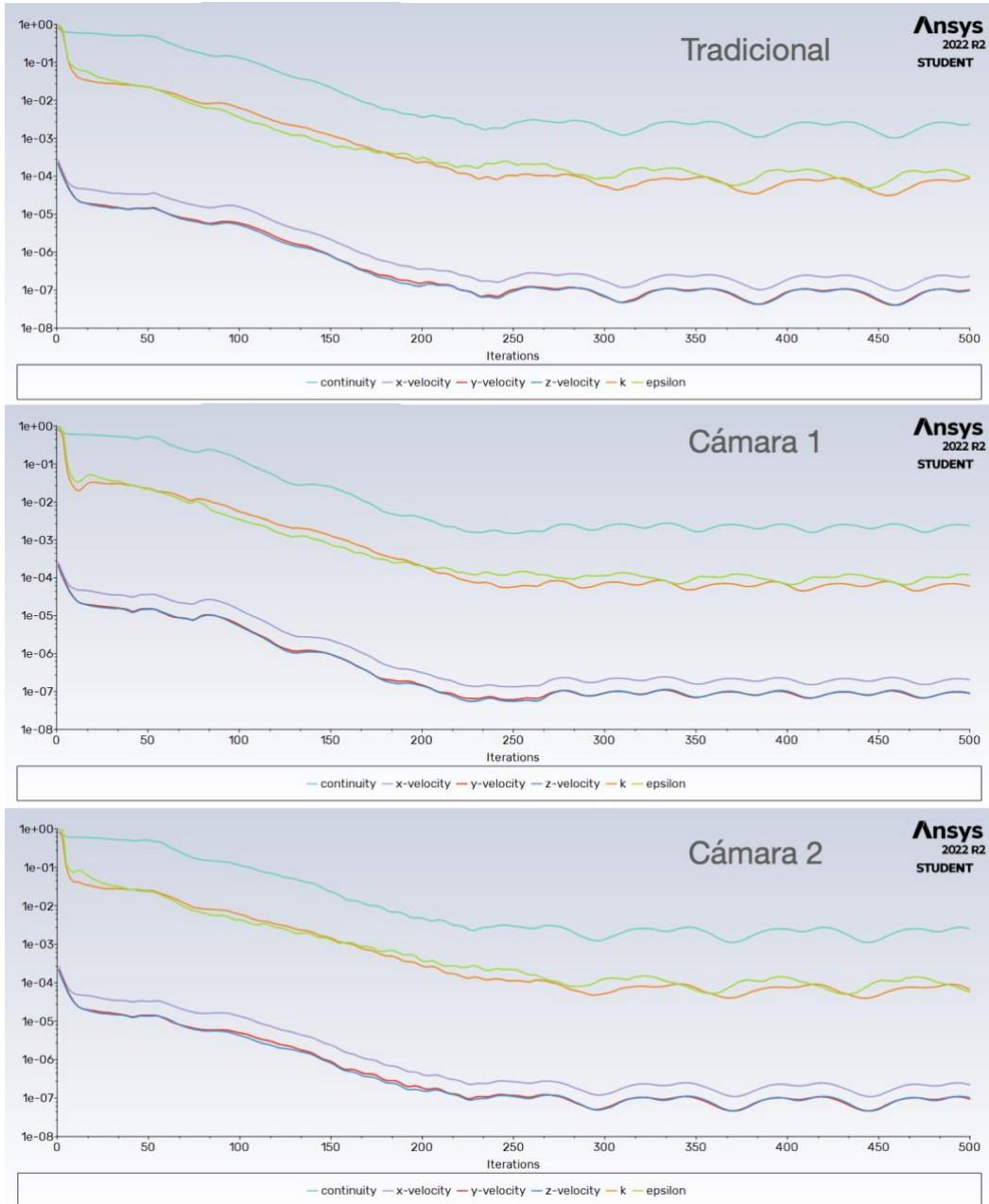


Figura 61 – Gráficas de los residuales según modelo

No obstante, la medida de interés para este proyecto es la fuerza de arrastre, por lo que independientemente de los residuales hay que comprobar que también haya convergido. En la Figura 62 se encuentran las gráficas de su evolución y es evidente que a partir de la iteración 200 la fuerza no varía en grandes cantidades, solo se va refinando. Además, en la consola de Fluent, que indica los valores que toman las variables en cada iteración, aparece que la fuerza de arrastre ha convergido según el criterio que se introdujo en el apartado 6.3.2.

Considerándolo todo, es procedente concluir que la simulación es fiable y sus resultados útiles dentro de los márgenes de error aceptables por el escaso número de celdas en las mallas utilizadas.

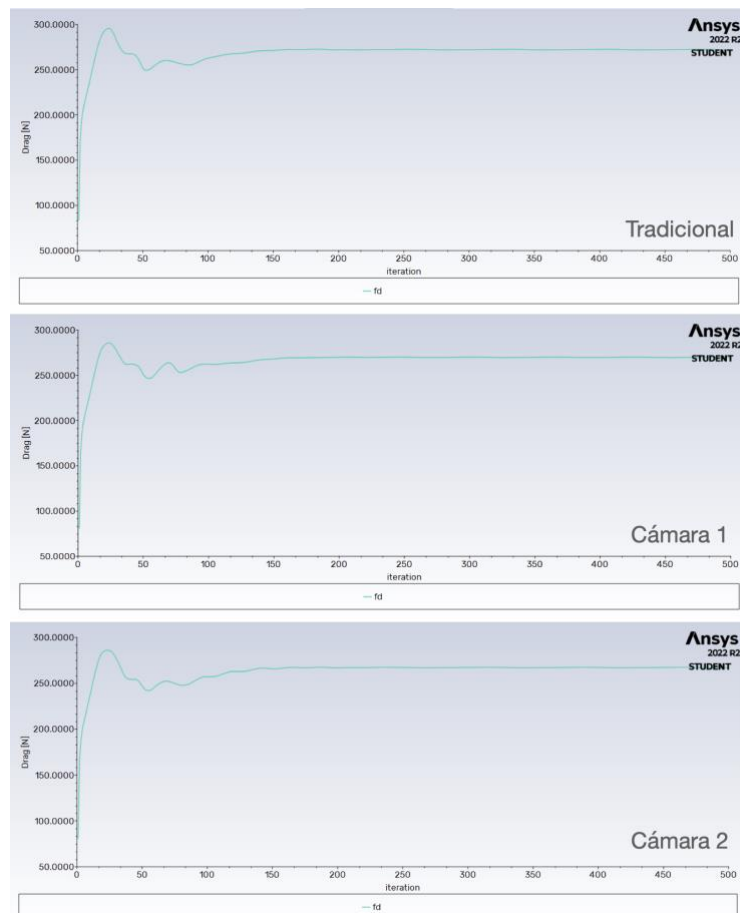


Figura 62 - Gráficas de F_d según modelo

Capítulo 7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

7.1 RESULTADOS NUMÉRICOS

Los resultados numéricos se basan en la simulación de solo la mitad del vehículo, así que hay que multiplicar los resultados del área y de la fuerza de arrastre por dos para obtener los valores reales del vehículo completo. Además, como se ha comentado en el apartado anterior, las soluciones oscilan de forma estable y senoidal a partir de la iteración 300 con una periodicidad de en torno a las 50 iteraciones y una variación porcentual indicada en la Tabla 4, por lo que se ha escogido la media aritmética para los cálculos posteriores.

<i>Tipo de retrovisor:</i>	<i>Tradicional</i>	<i>Cámara 1</i>	<i>Cámara 2</i>
Área frontal [m ²]	2,1358	2,091	2,0928
C _d []	0,3742	0,3794	0,375
F _d [N]	544,4	539,8	534,44
Variación de F _d respecto a su media [%]	0,11	0,074	0,0936
Ahorro respecto al tradicional [%]	-	0,845	1,83

Tabla 4 - Resultados de las fuerzas

En primer lugar, cabe destacar que las diferencias son muy pequeñas, sobre todo teniendo en cuenta el margen de error de entorno al 0,1% de las soluciones. Comparando los

coeficientes de *drag*, ambos modelos de retrovisor de cámara tienen valores superiores al de referencia del retrovisor tradicional, es decir, se ha perdido eficiencia aerodinámica al eliminar o empequeñecer el retrovisor, por lo que se puede deducir que el diseño tradicional juega un papel importante a la hora de ordenar el flujo, los vórtices y la estela generada por el frontal del vehículo. En el próximo apartado se investigará con detalle dicho comportamiento del fluido.

Especialmente sorprendentes son los malos resultados de la versión de cámara 1 inspirada por el VW LX1, que a priori parecía la mejor opción debido a que la cámara estaba más incorporada en el chasis y parecía que iba a alterar menos el flujo de aire. El segundo modelo con cámara integrada obtiene claramente mejores resultados, con la menor fuerza de arrastre de los tres modelos a pesar de tener mayor área frontal que el retrovisor con cámara 1. En definitiva, parece que tener un elemento para dirigir el flujo en la zona de los retrovisores es beneficioso y que la reducción en la fuerza de arrastre se debe únicamente a la menor área frontal de los modelos de cámara y no a una mayor eficiencia aerodinámica, lo cual es lo contrario a lo que se esperaba.

Siguiendo los pasos expuestos en el capítulo 4.2, se multiplican las variaciones porcentuales por su proporción según el tipo de vehículo para ver el efecto total sobre las pérdidas de un coche y se ordenan los resultados en la Tabla 5.

<i>Tipo de motor:</i>	<i>Gasolina</i>	<i>Híbrido</i>	<i>Eléctrico</i>
Cámara 1	0,1352	0,1606	0,3972
Cámara 2	0,2928	0,3477	0,8601

Tabla 5 - Resultados finales

En conclusión, la diferencia es muy pequeña y probablemente inapreciable para un consumidor individual que, en el mejor de los casos, con un vehículo eléctrico y los

retrovisores del modelo con cámara 2, ganaría 0,86km de autonomía por cada 100km recorridos. En coches con motor de combustión interna esta cifra baja hasta menos de 300 metros.

Por su pequeño efecto, el beneficio de esta tecnología solo se podría apreciar a nivel global, si todos los turismos la llevaran. En 2019 los coches de pasajeros fueron responsables de la emisión de 3,2 mil millones de toneladas de CO₂ [46] en todo el mundo. Asumiendo que de media entre coches de gasolina e híbridos el ahorro es del 0,3%, esto representaría 9,6 millones de toneladas de CO₂ que ya no serían expulsadas a la atmósfera al año. Tomando como ejemplo que un turismo medio de combustión en España produce alrededor de 3 toneladas de CO₂ al año [47], el cambio a retrovisores de cámara supondría el equivalente a que 3,2 millones de coches dejaran de circular. Ahora, en un marco global, sí cobra sentido el cambio en la geometría de los retrovisores y sería un gran paso adelante hacia un futuro más sostenible y ecológico, sin necesidad de reducir el uso de este transporte.

Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, el efecto aerodinámico no es la única variable que se debe tener en cuenta a la hora de valorar esta tecnología, el confort de los pasajeros en cuanto a las turbulencias y el ruido causado por el paso del flujo de aire entorno al coche también se debe considerar. Esto se analizará en el próximo apartado mediante las representaciones de los flujos simulados en Fluent.

7.2 ANÁLISIS DEL FLUJO

Con el fin de visualizar el comportamiento del aire se utilizan principalmente dos herramientas del programa Fluent: los *pathlines*, que son líneas que empiezan en un punto indicado y trazan los movimientos de las partículas del fluido y, por otro lado, los *contours* que colorean un plano o cara escogidos según la magnitud de una medida, como la presión o velocidad.

El primer paso será analizar los *pathlines* seleccionando como origen las caras del vehículo. Así, de cada celda saldrá una línea indicando el camino que recorre el aire que ha entrado en contacto con ella. Como referencia se toma el modelo con retrovisor tradicional en la Figura 63:

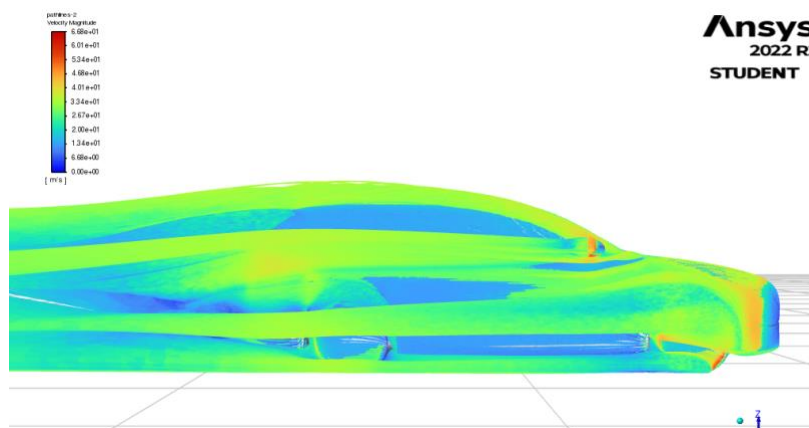


Figura 63 - Pathlines del retrovisor tradicional, vista lateral

Se reconocen varias estructuras en el flujo derivadas de la geometría del coche: un vórtice causado por el contacto entre cada rueda y el suelo, otro que nace de la parte superior de las ruedas, el vórtice originado por la esquina de la luna del vehículo que sube hasta permanecer en el techo y, los más vitales para este trabajo, los vórtices que desprenden el extremo del capó y la estela del retrovisor. Estos dos últimos serán los que se analicen y comparen entre cada modelo, ya que como se ha comentado previamente, para lograr una mayor sensación de comodidad en el interior del vehículo se debe alejar todo tipo de turbulencias y vórtices de las ventanillas que pueden hacerlas vibrar y transmitir el ruido al interior fácilmente.

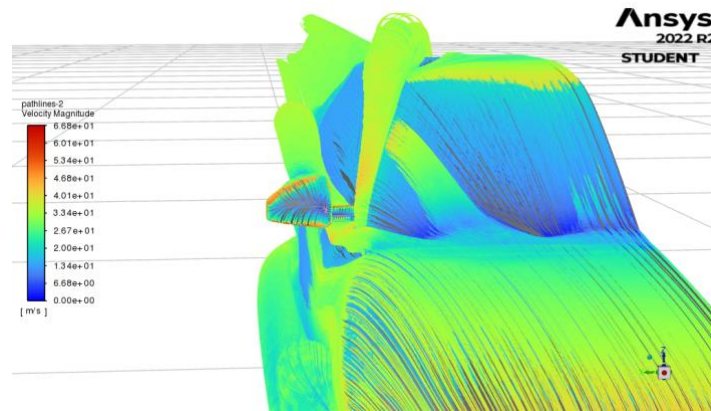


Figura 64 - Pathlines del retrovisor tradicional, vista frontal

Estudiando la Figura 64, se puede apreciar como el retrovisor tradicional, debido a su mayor tamaño, es capaz de alejar la estructura desprendida por el extremo lateral del capó y mantenerla alejada de las ventanillas. En el espacio entre el cuerpo principal del retrovisor y el chasis se crea una cortina de aire limpio que aísla el coche del aire turbulento, incluida la estela del propio retrovisor.

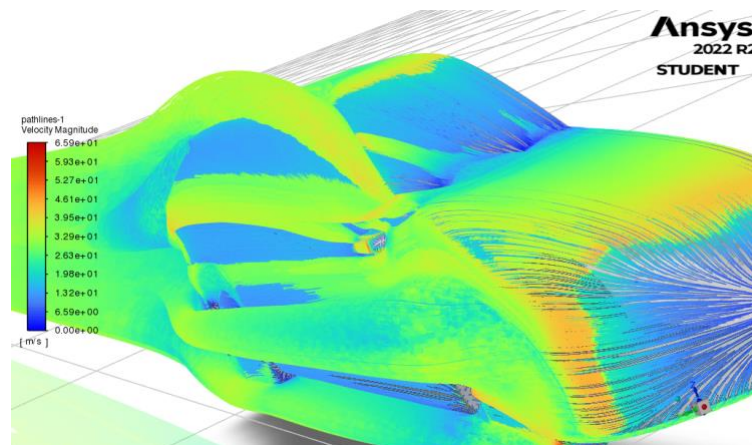


Figura 65 - Pathlines retrovisor de cámara 1

En cambio, el retrovisor con cámara 1 en la Figura 65, a pesar de estar incorporado en la puerta delantera del coche, no puede redirigir este flujo de la misma manera e incluso lo

llega a empujar ligeramente hacia arriba, es decir, hacia las ventanillas. Por ende, pese a su menor tamaño e integración en la geometría del coche, resulta en más turbulencias a lo largo del vehículo.

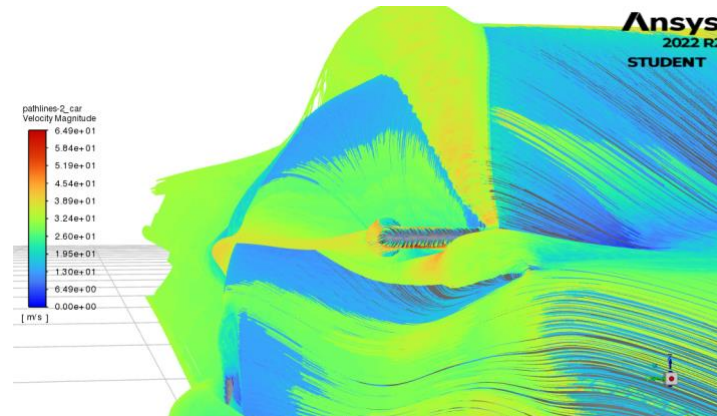


Figura 66 - Pathlines retrovisor con cámara 2

Un punto medio es el segundo modelo de retrovisor con cámara (Figura 66), que gracias a su puente sí logra alejar dicha estructura, pero no tan eficientemente como el retrovisor tradicional. Sin embargo, debido a su forma cilíndrica que a priori parece más aerodinámica, desprende un vórtice muy potente que en su parte inferior empuja las turbulencias generadas por el capó hacia la zona de las ventanillas, lo cual es justo lo que se desea evitar.

En resumen, parece que ambos modelos de retrovisor con cámara son incapaces de alejar las turbulencias generadas por el frontal del vehículo. Para confirmar esto, se crean dos planos: uno en $x=1$ que es justo detrás de los retrovisores y otro en $x=2$ que está a la mitad del coche, donde se encuentran las ventanillas. Mediante la herramienta de *contour* se pintan los planos según la intensidad de su energía cinética turbulenta y se establece como máximo $10\text{m}^2/\text{s}^2$ para que las estructuras cercanas a las ventanillas se vean con claridad, ya que por defecto el programa pone como límite el valor más grande que encuentra en el plano y este se localiza en la zona de las ruedas, tiene una magnitud muy superior a la de las turbulencias del capó y por ello no permitiría visualizarlas correctamente.

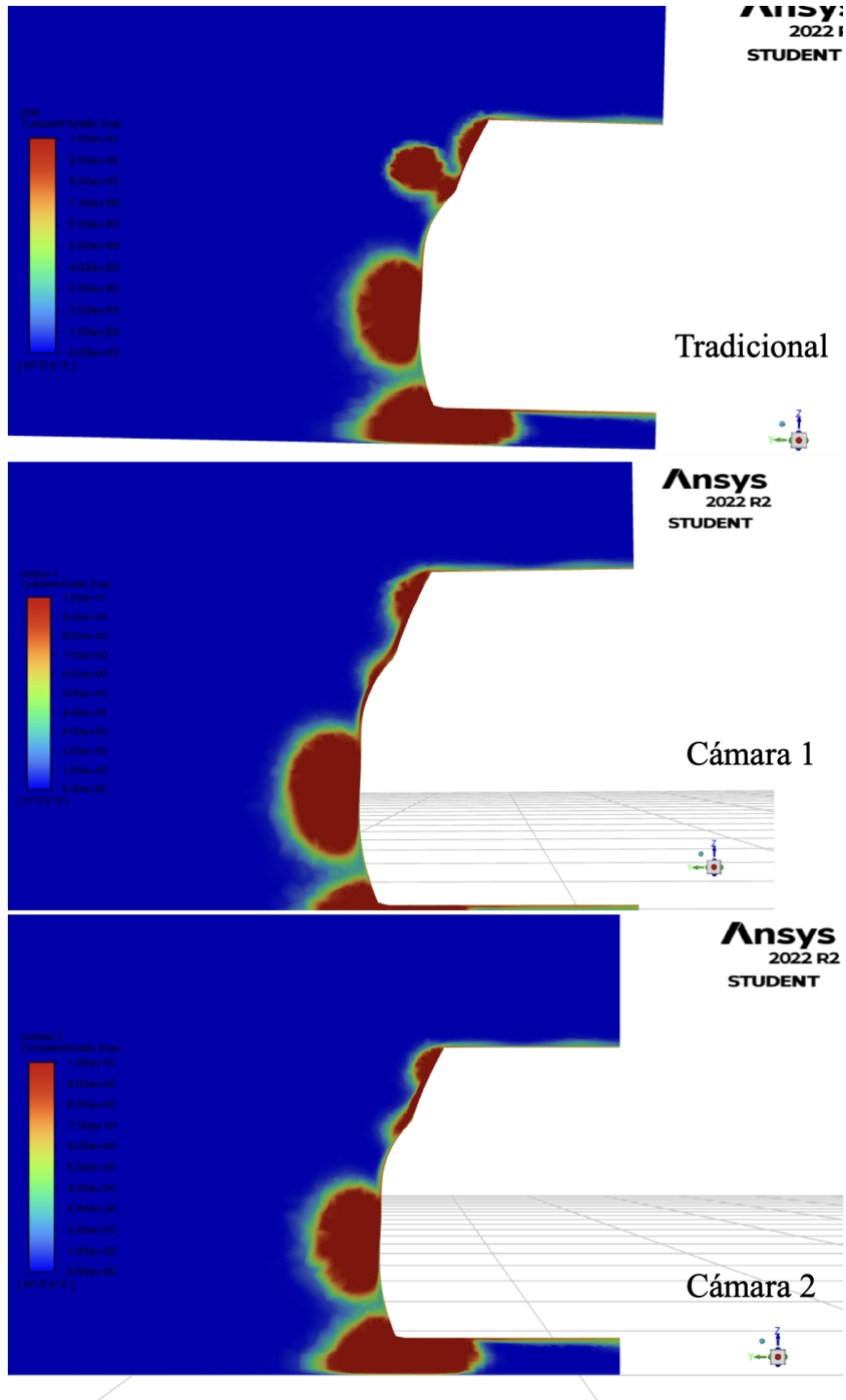


Figura 67 - Energía cinética turbulenta en $x=1$

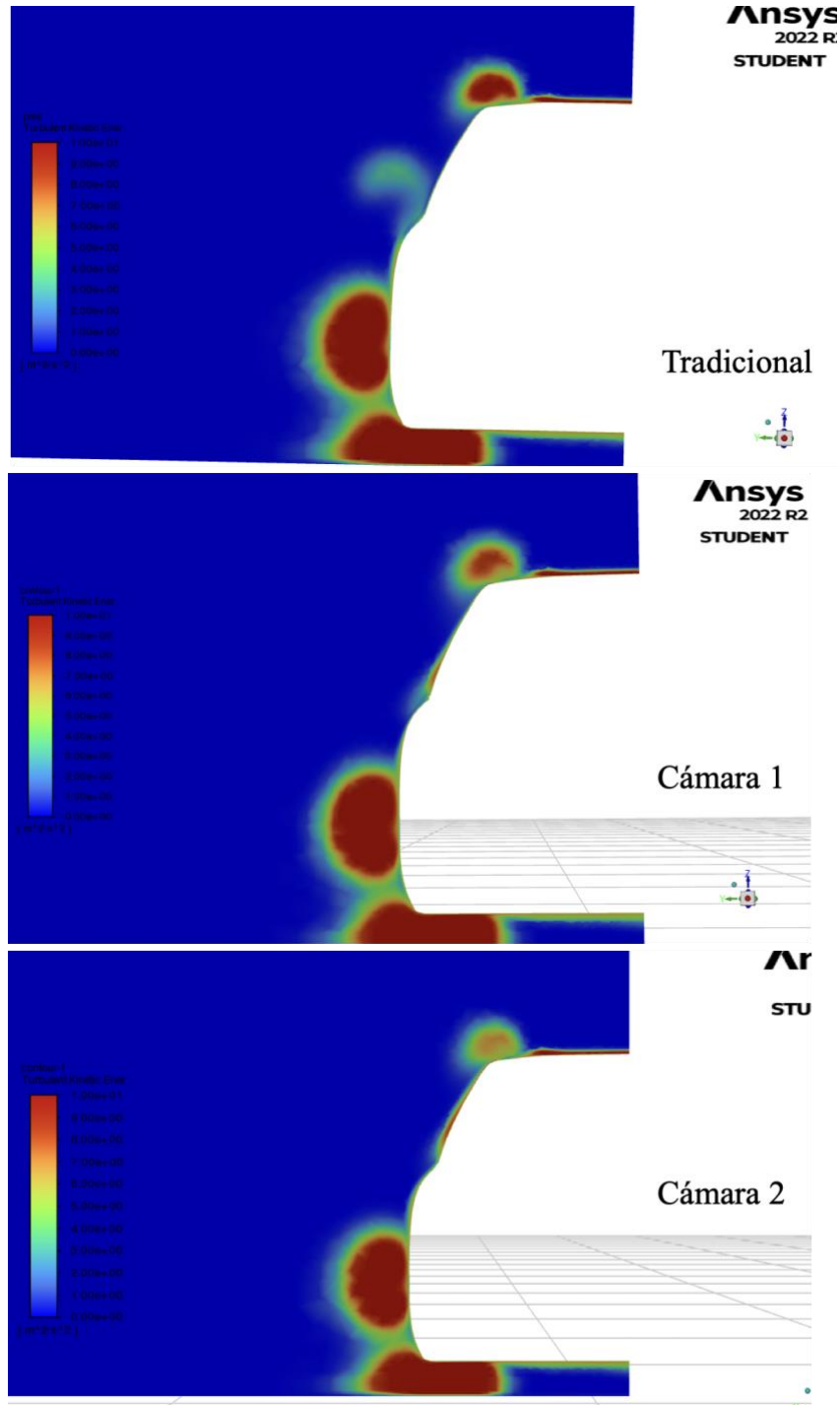


Figura 68 - Energía cinética turbulenta en $x=2$

En las figuras Figura 67 Figura 68 se observan las estructuras mencionadas anteriormente creadas por el contacto de la rueda con el suelo, la parte superior de las ruedas, los retrovisores y la esquina de la luna delantera. Claramente, el retrovisor tradicional deja detrás de sí una estela muy grande comparado con los otros dos retrovisores, pero un metro después se puede ver que la mayoría de esas turbulencias se han disipado. Lo más importante para este trabajo es la zona pegada a los cristales y el segundo plano en la Figura 68 muestra diferencias evidentes entre los modelos de retrovisores. El tradicional no tiene prácticamente ninguna capa de flujo turbulento ligada a las ventanillas, indicando que el aire limpio que fluye entre el retrovisor y el chasis está haciendo su trabajo de aislar al vehículo del aire sucio tanto del capó como del propio retrovisor. En cambio, los de cámara sí muestran una zona de aire sucio junto a los cristales que probablemente cause vibraciones y ruidos. Estos resultados confirman lo que se había deducido de los *pathlines* anteriormente.

Por último, como comentario adicional, un resultado sorprendente que no se había previsto con las trazas del flujo es que el vórtice desprendido por la esquina entre la luna y las ventanillas es menos potente en los modelos con cámara, especialmente el que está incorporado en el chasis. Esto se puede deber a que, por su tamaño, el retrovisor tradicional fuerza más flujo hacia esa esquina y hacia arriba, alimentando la estructura.

Capítulo 8. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se han cubierto las bases de mecánica de fluidos y de la dinámica de fluidos computacional. Se han mostrado los pasos que se deben tomar para generar una malla, comprobar su calidad y simularla bajo las condiciones deseadas monitorizando la convergencia de las soluciones. Además, se han justificado las decisiones tomadas durante la configuración del programa basándose en la teoría expuesta y se han utilizado diferentes herramientas para analizar los resultados de forma numérica, con los parámetros C_d y F_d , y visual, mediante *pathlines* y *contours*. Como conclusión se ha valorado que la reducción en cuanto a *drag* y, por ende, de emisión de CO₂, es muy pequeña y solo es notable a escala global. Sin embargo, a nivel individual, la comodidad de los pasajeros del vehículo se puede ver afectada a causa de que los retrovisores con cámara no son capaces de alejar el flujo turbulento que expulsa el capó de los laterales del vehículo y que acaba impactando contra las ventanillas, mientras que el conductor no percibirá ningún beneficio evidente en cuanto a autonomía del coche.

En relación con la fiabilidad de los resultados, ya se ha comentado numerosas veces que, a pesar de haber realizado las simulaciones con un buen criterio, son difícilmente extrapolables al mundo real. Ni la geometría del modelo base, ni los distintos retrovisores están optimizados aerodinámicamente para trabajar en conjunto e iterando sus formas se podrían lograr mejores resultados. Asimismo, la malla no es lo suficientemente fina como para ser aceptable en un entorno profesional y para obtener una simulación más fiable se debe aumentar considerablemente el número de celdas. A pesar de todo esto, los valores numéricos que se han alcanzado en este proyecto son realistas y concuerdan con lo esperado en vehículos similares. Por otro lado, el efecto del aire turbulento a los lados del coche se tendría que valorar en un túnel de viento para ver su magnitud y la incomodidad que genera en el interior y así poder concluir si el cambio a esta nueva tecnología es positivo o no.

Para poner en contexto los resultados obtenidos se toman algunos valores de referencia del libro ‘Race Car Aerodynamics’ de J. Katz [35], que relaciona el abrir las ventanillas del

coche con un aumento de 0,067 en el coeficiente de *drag* y con 0,09 el conducir con un coche descapotado, lo cual supone un aumento del 18% y 24% respectivamente en el *drag* del vehículo. Queda claro que el efecto que tienen los retrovisores es prácticamente despreciable frente a estas cifras, sobre todo teniendo en cuenta lo común que es conducir con las ventanillas bajadas. Además, esto perturbaría gravemente el flujo de aire y anularía los efectos de un diseño aerodinámico de los retrovisores. Otro caso típico es llevar las ruedas ligeramente desinfladas, ya sea por dejadez o ignorancia. Esto afecta directamente a la resistencia al rodamiento expuesto en el apartado 4.1.1 a través del coeficiente μ_r y, por lo tanto, demanda más potencia del motor que, a su vez, expulsará más CO₂ a la atmósfera. Todos estos casos empequeñecen la ligera mejora que ofrece la tecnología de cámaras en los retrovisores.

Anteriormente se habían comentado otras dos prácticas habituales en el ámbito de la optimización de la geometría de un vehículo: las cortinas de aire y el cubrir los bajos del coche con placas planas. Según investigaciones [49, 50], la primera de estas dos reduce el *drag* entre un 1% y un 3%, valores similares a los obtenidos en este proyecto para los nuevos retrovisores. Para los suelos planos no se han encontrado cifras exactas acerca de su efecto sobre la fuerza de arrastre, un exingeniero de la Fórmula 1 que ahora sube videos sobre aerodinámica en su canal de YouTube 'KYLE.ENGINEERS', realizó unas simulaciones comparando un coche genérico con unos bajos típicos y otros cubiertos por una placa plana y encontró una disminución de 15kg de *drag* [48], lo cual equivale a cerca de 150N. Este resultado parece excesivamente elevado comparado con los demás valores encontrados en este y otros proyectos y no se tomará como referencia. No obstante, la incorporación de un fondo plano suele ser la primera opción en las recomendaciones a la hora de mejorar la aerodinámica de un vehículo tipo turismo por su fácil implementación, su importante reducción del *drag* y especialmente por el aumento de carga que genera, que supone una mejora notable de la maniobrabilidad y estabilidad del coche a altas velocidades.

En resumen, estas dos opciones parecen mejores que los retrovisores tradicionales, porque no solo tienen un ligeramente mayor efecto positivo sobre el arrastre, sino que además merman las turbulencias alrededor del coche. Sin embargo, estas tres tecnologías son

compatibles y como sus impactos sobre la aerodinámica no son muy grandes, implementar el mayor número posible de pequeñas mejoras es el camino a seguir para optimizar el vehículo. Pero si se tuviera que priorizar alguna de ellas basándose en los resultados de este trabajo, la opción de los retrovisores con cámara no parece la más recomendable.

Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wikipedia. (2022). *Ford Modell T*. [online] Disponible en: https://de.wikipedia.org/wiki/Ford_Modell_T .
- [2] <https://www.facebook.com/Mon.fernandez.glez> (2014). *Fundamentos de la aerodinámica*. [online] PetrolheadGarage. Disponible en: <https://petrolheadgarage.com/cursos-automocion/fundamentos-aerodinamica/> .
- [3] Motor1.com (n.d.). *Concept We Forgot: 1938 Phantom Corsair*. [online] Disponible en: <https://www.motor1.com/news/62272/concept-we-forgot-1938-phantom-corsair/> .
- [4] HumanProgress. (2022). *Are Gas Prices Really the Highest in History?* [online] Disponible en: <https://www.humanprogress.org/are-gas-prices-really-the-highest-in-history/> .
- [5] autoflotte.de (n.d.). *Audi A8 Fahrbericht: Ist das die Krone der automobilen Schöpfung?* [online] Disponible en: <https://www.autoflotte.de/nachrichten/fahrberichte/audi-a8-fahrbericht-ist-das-die-krone-der-automobilen-schoepfung-3346185> .
- [6] Hemmings.com. (2023). Disponible en: <https://www.hemmings.com/stories/2013/11/04/lost-cars-of-the-1980s-cadillac-cimarronAAAAABAE> .
- [7] Wikipedia. (2023). *Chevrolet Citation*. [online] Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Chevrolet_Citation .
- [8] Motor1.com. (n.d.) *Audi Q5 Facelift (2020): Jetzt drei Motoren verfügbar, ab 44.645 Euro*. [online] Disponible en: <https://de.motor1.com/news/431257/audi-q5-facelift-2020-oled-ruckleuchten/> .
- [9] Hefler, M. (2005). *General Aspects of Vehicle Aeroacoustics*. [online] researchgate.net. Disponible en: <https://www.researchgate.net/> .
- [10] Gaylord, A. (2017). *The aerodynamics development of the New Land Rover Discovery*. [online] researchgate.net. Disponible en: <https://www.researchgate.net/> .

- [11] www.istockphoto.com. (n.d.). *Blue Truck - Bilder und Stockfotos - iStock*. [online] Disponible en: <https://www.istockphoto.com/de/search/more-like-this/519388984?assettype=image%2Cfilm&phrase=blue%20truck> .
- [12] Top Gear. (2017). *Alpine's new sports car has some aerodynamics*. [online] Disponible en: <https://www.topgear.com/car-news/alpines-new-sports-car-has-some-aerodynamics> .
- [13] Osmá, M.F. (2019). *La capa límite*. [online] Aerodinámica F1. Disponible en: <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/la-capa-limite/> .
- [14] Rodríguez, S.B. (2019). LES and DNS Turbulence Modeling. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-28691-0_5 .
- [15] www.linkedin.com. (n.d.) *Better meshing using ANSYS Fluent Meshing?* [online] Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/better-meshing-using-ansys-fluent-hashan-mendis/?published=t> .
- [16] www.fueleconomy.gov. (n.d.). *Where the Energy Goes: Electric Cars*. [online] Disponible en: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv-ev.shtml> .
- [17] www.honda.co.uk. (n.d.). *Offers*. [online] Disponible en: <https://www.honda.co.uk/cars/new/honda-e/offers.html> .
- [18] abc. (2020). *Los prototipos más llamativos de Renault en los últimos 20 años*. [online] Disponible en: https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-prototipos-mas-llamativos-renault-ultimos-20-anos-202008250133_noticia.html .
- [19] Wikipedia. (2020). *Flow separation*. [online] Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_separation .
- [20] Facebook. (n.d.). *Flujo laminar y turbulento*. [online] Disponible en: <https://www.facebook.com/GrupoAutocontrol.SV/posts/1094605984039819/> .
- [21] tec-science (2020). *Flow separation (boundary layer separation)*. [online] tec-science. Disponible en: <https://www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/flow-separation-boundary-layer-separation/> .
- [22] 365 Performance Plus. (n.d.). *Vortex Generator - Toyota/Subaru GR86/BRZ 2022+*. [online] Disponible en: <https://www.365performanceplus.com/products/cf-522012> .

- [23] GeeksforGeeks. (2019). *ML / Binning or Discretization*. [online] Disponible en: <https://www.geeksforgeeks.org/ml-binning-or-discretization/> .
- [24] PNUD. (n.d.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible / Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo*. [online] Disponible en: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals> .
- [25] Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector (infografía) | Noticias | Parlamento Europeo. (n.d.). Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia> .
- [26] esmovilidad.mitma.es. (n.d.). *Infografía sobre emisiones CO2 de los coches / Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030*. [online] Disponible en: <https://esmovilidad.mitma.es/noticias/infografia-sobre-emisiones-co2-de-los-coches>.
- [27] Martín, P. (2022). *Prohibir los motores de combustión en la UE en 2035 no será tan fácil: Alemania se opone*. [online] elconfidencial.com. Disponible en: https://www.elconfidencial.com/motor/industria/2022-06-22/ue-emisiones-motores-combustion-christian-lindner_3447795/ .
- [28] Clicars (2021). *Espejos retrovisores con cámara: Ventajas e inconvenientes - Clicars Blog*. [online] Clicars. Disponible en: <https://www.clicars.com/blog/curiosidades/retrovisores-con-camara/>.
- [29] How cars went from boxy to curvy. (2016). *YouTube*. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=IVjmIovOPek> .
- [30] www.youtube.com. (n.d.). *Ep. 13 100 Years of Car Design: An Overview*. [online] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=nfAmIOrczHI> .
- [31] www.youtube.com . (n.d.). *Car Mirror Design - EXPLAINED*. [online] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=viDyJ2AvVcM&list=WL&index=3>.
- [32] Cfd-online.com. (2013). *Turbulence modeling -- CFD-Wiki, the free CFD reference*. [online] Disponible en: https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_modeling .
- [33] www.youtube.com. (n.d.). *How Do Air Curtains Work?* [online] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=ptNnbB7R3SE> .

- [34] Vilches, S. (2015). ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL DE BILBAO GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA TRABAJO FIN DE GRADO 3. CÁLCULOS DATOS DE LA ALUMNA O DEL ALUMNO. [online] Disponible en: <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/18374/3%20-%20Calculos.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- [35] Katz, J. (2006). *Race car aerodynamics : designing for speed*. Cambridge, Ma: R. Bentley.
- [36] NUMECA. CFD Online Course. 6 de diciembre del 2022 –21 de febrero del 2023. Ofrecido por la Universidad RWTH Aachen.
- [37] www.epc.ed.tum.de. (n.d.). *DrivAer*. [online] Disponible en: <https://www.epc.ed.tum.de/en/aer/research-groups/automotive/drivaer/>.
- [38] Serban, T. (n.d.). *NISSAN Qashqai Specs & Photos - 2007, 2008, 2009, 2010*. [online] autoevolution. Disponible en: https://www.autoevolution.com/cars/nissan-qashqai-2007.html#agal_0.
- [39] Top Gear. (2015). *Volkswagen XL1 Review 2023*. [online] Disponible en: <https://www.topgear.com/car-reviews/volkswagen/xl1>.
- [40] <https://www.facebook.com/antonioafg> (2022). *Honda e:N2 Concept, el anticipo de un nuevo coche eléctrico para conquistar China*. [online] Motor.es. Disponible en: <https://www.motor.es/noticias/honda-en2-concept-202291034.html>.
- [41] Curso de ICAI: Introduction to Computational Fluid Dynamics 2022-2023
- [42] ResearchGate. (n.d.). *Difference between standard and realizable k-epsilon model?* [online] Disponible en: <https://www.researchgate.net/post/Difference-between-standard-and-realizable-k-epsilon-model>.
- [43] Enea.it. (2023). *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 4.12.3 Non-Equilibrium Wall Functions*. [online] Disponible en: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node100.htm#:~:text=The%20Ononequilibrium%20wall%20functions%20account>.
- [44] COMSOL. (n.d.). *Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application?* [online] Disponible en: <https://www.comsol.de/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>.

- [45] Reyes, L. (n.d.). *¿Cómo calcular el CO2 a partir del consumo?: Diésel vs. gasolina vs. GLP vs. GNC vs. electricidad.* [online] www.autonocion.com. Disponible en: <https://www.autonocion.com/calcular-el-co2-a-partir-del-consumo/>.
- [46] Tiseo, I. (2021). *Carbon dioxide emissions from passenger road transport.* [online] Statista. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/1107970/carbon-dioxide-emissions-passenger-transport/>.
- [47] Amadoz, S. (2023). *¿Cuánto CO2 emite de verdad un coche eléctrico? Esta herramienta lo calcula.* [online] El Motor. Disponible en: <https://motor.elpais.com/actualidad/cuanto-co2-emite-de-verdad-un-coche-electrico-esta-herramienta-lo-calcula/>.
- [48] www.youtube.com. (n.d.). *How Effective is a Flat Floor? (on cars).* [online] Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=pXYJpXKmp_E.
- [49] M. Dickison, M. Ghaleeh, S. Milady, S. Subbakrishna, L. T. Wen and M. Al Qubeissi (2019) *Investigation into the Aerodynamic Performance of a Concept Sports Car*, Disponible en: https://www.jafmonline.net/article_948_2d493b96e91dcab318c97f0e43fe5bda.pdf
- [50] A. Ferraris, H de Carvalho, A. Airale, M. Carello (2021) *City Car Drag Reduction by means of Flow Control Devices*, Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Henrique-De-Carvalho-Pinheiro/publication/350413062_City_Car_Drag_Reduction_by_means_of_Flow_Control_Devices/links/615ff942ae47db4e57a520ee/City-Car-Drag-Reduction-by-means-of-Flow-Control-Devices.pdf