

MASTER UNIVERSITARI EN ENGINYERIA INDUSTRIAL
especialitzat en Termoenergètica

Autor: Pol Hernández Mañas

**Estudi numèric de la aeroacústica en els
retrovisors dels turismes**

Director: Roberto Castilla Lopez

Convocatòria: Maig 2021

Data: 26/04/2021



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

ABSTRACT

The main objective of this work is the numerical demonstration of the incidence at the acoustic level of the side-view mirrors in vehicles. A custom execution code has been designed with OpenFOAM software from fluid mechanics and aerodynamic resolution methods. The aim is to achieve mathematical stability and reliability to give the maximum possible validity to the results. Using the SIMPLE tool for the stationary study and the PIMPLE tool for the transitory case. Finally, with the Curle analogy and the Fourier transformation, 8 observation points placed near the side-view mirror are represented to create the SPL acoustic spectra. With this computational scenario, it has been possible to demonstrate that the inclusion of the side-view mirror has a remarkable incidence of 20 dB compared to the case without it, in the acoustic range of 100 to 4000 Hz, which is the area of most sound sensitivity for humans.

RESUM

L'objectiu principal d'aquest treball és la demostració numèrica de la incidència acústica dels retrovisors en els vehicles. Ha estat dissenyat un codi d'execució personalitzat amb el programari OpenFOAM de mecànica de fluids i mètodes de resolució aerodinàmica. Amb això s'ha buscat aconseguir la màxima robustesa matemàtica i fiabilitat per donar la màxima validesa possible als resultats. Utilitzant l'eina SIMPLE per a l'estudi estacionari i l'eina PIMPLE per al cas transitori. Finalment, amb l'analogia de Curle i la transformada de Fourier, es representen 8 punts d'observació situats prop del retrovisor per crear l'espectre acústic (SPL). Amb aquest escenari computacional, ha estat possible demostrar que la inclusió del retrovisor té una incidència notable de 20 dB més en comparació amb el cas sense ell, en el rang acústic de 100 a 4000 Hz, que és l'àrea de més sensibilitat sonora per als humans.

ÍNDIX DE FIGURES

Figura.: 1: Volum de control o cel·la tipus [19] _____	15
Figura.: 2: Corbes de igual sonoritat [21] _____	21
Figura.: 3: Representació gràfica de les fonts sonores [19] _____	23
Figura.: 4: Esquema de la part estacionaria amb el OpenFOAM _____	29
Figura.: 5: Esquema de la part transitòria de OpenFOAM _____	32
Figura.: 6: Esquema simulacions estacionaries _____	35
Figura.: 7: Esquema simulacions transitòries _____	36
Figura.: 8: Estructura prèvia OpenFOAM _____	37
Figura.: 9: Estructura posterior OpenFOAM _____	37
Figura.: 10: Geometria retrovisor 1 _____	38
Figura.: 11: Geometria retrovisor 2 _____	38
Figura.: 12: Imatge retrovisor 1 _____	39
Figura.: 13: Imatge retrovisor 2 _____	39
Figura.: 14: Geometria Simplecar 1 _____	40
Figura.: 15: Geometria Simplecar 2 _____	40
Figura.: 16: Geometria Complexcar sense retrovisor 1 _____	41
Figura.: 17: Geometria Complexcar sense retrovisor 2 _____	41
Figura.: 18: Geometria Complexcar amb retrovisor 1 _____	42
Figura.: 19: Geometria Complexcar amb retrovisor 2 _____	42
Figura.: 20: Comparativa forces aerodinàmiques - CFD _____	49
Figura.: 21: Comparativa coeficients aerodinàmics _____	50
Figura.: 22: Representació del pla de la Velocitat [m/s] en X sense retrovisor _____	51
Figura.: 23: Representació del pla de la Velocitat [m/s] en X amb retrovisor _____	51
Figura.: 24: Representació del pla de la Velocitat [m/s] en Z sense retrovisor _____	51
Figura.: 25: Representació del pla de la Velocitat [m/s] en Z amb retrovisor _____	51
Figura.: 26: Representació de la Velocitat [m/s] en X sense retrovisor _____	52
Figura.: 27: Representació de la Velocitat [m/s] en X amb retrovisor _____	52
Figura.: 28: Representació de la Velocitat [m/s] en Z sense retrovisor _____	53
Figura.: 29: Representació de la Velocitat [m/s] en Z amb retrovisor _____	53
Figura.: 30: Detall 1 de la Velocitat [m/s] en X sense retrovisor _____	54
Figura.: 31: Detall 1 de la Velocitat [m/s] en X amb retrovisor _____	54

Figura.: 32: Detall 2 de la Velocitat [m/s] en X sense retrovisor	55
Figura.: 33: Detall 2 de la Velocitat [m/s] en X amb retrovisor	55
Figura.: 34: Comparativa forces aerodinàmiques - AAC	57
Figura.: 35: Comparativa Courant mig	58
Figura.: 36: Comparativa Courant màxim	59
Figura.: 37: Representació del pla de la Pressió [Pa] sense retrovisor	60
Figura.: 38: Representació del pla de la Pressió [Pa] amb retrovisor	60
Figura.: 39: Representació de la Pressió [Pa] sense retrovisor	61
Figura.: 40: Representació de la Pressió [Pa] amb retrovisor	61
Figura.: 41: Detall de distribució de la Pressió [Pa] sense retrovisor	62
Figura.: 42: Detall de distribució de la Pressió [Pa] amb retrovisor	62
Figura.: 43: Detall 1 línies de Pressió [Pa] sense retrovisor	63
Figura.: 44: Detall 1 línies de Pressió [Pa] amb retrovisor	63
Figura.: 45: Detall 2 línies de Pressió [Pa] sense retrovisor	64
Figura.: 46: Detall 2 línies de Pressió [Pa] amb retrovisor	64
Figura.: 47: Col·locació espacial dels punts d'observació pel cas amb retrovisor	65
Figura.: 48: Col·locació espacial dels punts d'observació pel cas sense retrovisor	65
Figura.: 49: Comparativa SPL - Punt 0	66
Figura.: 50: Comparativa SPL - Punt 1	67
Figura.: 51: Comparativa SPL - Punt 2	67
Figura.: 52: Comparativa SPL - Punt 3	68
Figura.: 53: Comparativa SPL - Punt 4	69
Figura.: 54: Comparativa SPL - Punt 5	69
Figura.: 55: Comparativa SPL - Punt 6	70
Figura.: 56: Comparativa SPL - Punt 7	71

ÍNDIX DE TAULES

Taula 1: Característiques hardware OpenFOAM	28
Taula 2: Mitjanes logarítmiques dels SPL	71

ÍNDEX:

ABSTRACT	i
RESUM	ii
ÍNDIX DE FIGURES	iii
ÍNDIX DE TAULES	v
ÍNDIX:	vi
GLOSSARI	ix
1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. Objectius	1
1.2. Abast	2
1.3. Estructura del treball	3
1.4. Utilitat del treball	3
1.4.1. Plantejament del problema	3
1.4.2. Estat de l'art i antecedents	4
2. BASE TEÒRICA	9
2.1. Equacions fonamentals de la mecànica de fluids	9
2.1.1. Flux turbulent	11
2.1.2. Coeficients aerodinàmics i forces	12
2.2. CFD – Dinàmica de Fluids Computacional	13
2.2.1. Mètode de Volums Finites	13
2.2.2. Simulació numèrica directa (DNS)	16
2.2.3. Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)	17
2.2.4. Large Eddy Simulations (LES)	18
2.3. AAC – Aeroacústica Computacional	19
2.3.1. Introducció	19
2.3.2. Física del so	20

2.3.3.	Transformada de Fourier (FFT)	21
2.3.4.	Teorema de Nyquist	22
2.3.5.	Simulació numèrica directa (DNS)	23
2.3.6.	Analogia de Lighthill	24
2.3.7.	Analogia de Curle	25
3.	PROGRAMARI CFD	27
3.1.	OpenFOAM	27
3.1.1.	Per què OpenFOAM	27
3.1.2.	Primers passos	27
3.2.	Aerodinàmica: Simulacions estacionàries	29
3.2.1.	Esquema simulació OpenFOAM	29
3.3.	Aeroacústica: Simulacions transitòries	32
3.3.1.	Esquema simulació OpenFOAM	32
4.	METODOLOGIA DEL CAS	34
4.1.	Esquemes i estructures OpenFOAM i simulacions	35
4.1.1.	Esquema de simulacions: Part estacionària	35
4.1.2.	Esquema de simulacions: Part transitòria	36
4.1.3.	Estructura OpenFOAM	37
4.2.	Geometria	38
4.2.1.	Retrovisor	38
4.2.2.	Geometria 1 - Simplecar	39
4.2.3.	Geometria 2 - Complexcar	40
4.3.	Mallat i flux estacionari (Aerodinàmica)	42
4.4.	Flux transitori (Aeroacústica)	45
5.	RESULTATS NUMÈRICS	48
5.1.	Resultats part estacionària – Aerodinàmica	48
5.2.	Resultats part transitòria – Aeroacústica	56
6.	CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR	72

6.1. Conclusions i discussió de resultats	72
6.2. Treball futur	75
AGRAÏMENTS	77
BIBLIOGRAFIA	78

GLOSSARI

- **TFM:** Treball Final de Màster
- **ESEIAAT:** Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa
- **CFD:** Computacional Fluid Dynamics
- **N-S:** Navier-Stokes
- **MVF:** Mètode de Volums Finitis
- **DNS:** Direct Numerical Simulation
- **RANS:** Reynolds Averaged Navier-Sotkes
- **LES:** Large Eddy Simulation
- **SPL:** Sound Pressure Level
- **FFT:** Fourier's Frequency Transformation
- **DFT:** Discrete Fourier Transformation
- **CPU:** Computer Processor Unit
- **RAM:** Random Access Memory
- **HDD:** Hard Disk Drive
- **DES:** Detached Eddy Simulation
- **SUV:** Suburban Vehicle
- **Estocàstica:** es denomina al sistema el qual, el comportament intrínsec no és determinista

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és **obtenir**, mitjançant càlculs de aeroacústica computacional, **resultats** que permetin estimar numèricament la **diferència** de intensitat **acústica** entre tenir o no retrovisors als vehicles.

Per fer-ho, s'ha d'acomplir una sèrie de objectius secundaris que englobarien a l'objectiu principal comentat:

- Recercar sobre l'estat de l'art de la aeroacústica i la aerodinàmica amb OpenFOAM. És vital tenir un precedent sobre quins estudis s'han fet i en quines condicions, per tenir un fil de recerca a seguir i intentar aportar innovació respecte al ja investigat. Això permetria poder arribar a conclusions des de punts de partida diferents als ja consultats i poder discutir els resultats amb més objectivitat i coherència.
- Desenvolupar un model de simulació que s'adapti a les necessitats d'aquest treball amb el programari OpenFOAM. És important poder tenir un codi en OpenFOAM que estigui adaptat a resoldre i seguir totes les fases d'aquest projecte i poder decidir els paràmetres a modificar, així com, justificar els criteris seguits amb els resultats obtinguts.
- Crear amb el OpenFOAM una malla 3D suficientment definida per a la geometria seleccionada. Acomplint aquest objectiu es busca aconseguir un refinament sobre la geometria com per poder desvincular els resultats a la resolució de la malla. Fent així, que es puguin copsar uns resultats prou bons com per estar en sintonia amb altres recerques científiques.
- Calcular les forces aerodinàmiques sobre la superfície del model de turisme 3D. Amb aquest objectiu es busca tenir uns resultats numèrics referents per poder avaluar i discutir si el model té un comportament aerodinàmic prou bo en comparació amb altres models estudiats per altres investigadors, i poder així, tenir uns resultats objectius per poder establir un escenari aerodinàmic per al càlcul de la pressió.
- Calcular la pressió sobre la superfície del retrovisor modelitzat, per poder mostrar un espectre acústic al voltant d'aquest, que permeti tenir una representació quantitativa.

Amb això es vol discutir numèricament els resultats respecte el mateix model sense retrovisor. Identificant numèricament respecte el model sense retrovisor, si té una incidència acústica rellevant o no.

1.2. Abast

S'inclourà:

- Ús del model de retrovisor 3D prèviament dissenyat.
- Ús del programari OpenFOAM en la versió 2006 de ESI [1].
- La potència màxima disponible serà la del clúster del departament de Fluids de la ESEIAAT.
- Documentació teòrica de tota la part matemàtica aplicada a les simulacions.
- Estudi numèric de la aerodinàmica del model sense retrovisor.
- Estudi numèric de la aerodinàmica del model amb retrovisor.
- Estudi numèric de la aeroacústica del model sense retrovisor.
- Estudi numèric de la aeroacústica del model amb retrovisor.

No s'inclourà:

- Desenvolupar un model específic de geometria de vehicle per aquest cas.
- Utilitzat més d'un model de retrovisor.
- Creació de noves llibreries per al programa OpenFOAM.
- Estudi experimental de la aerodinàmica del cas.
- Estudi experimental de la aeroacústica del cas.
- Estudi en profunditat de la acústica.
- Documentació detallada a nivell matemàtic de les fórmules i el seu desenvolupament detallat.
- Estudis aerodinàmics per a diferents velocitats de fluid.

1.3. Estructura del treball

Aquest document està organitzat en 5 grans blocs sense comptar amb aquest primer que és introductori.

Al capítol 2, es fa una aproximació als conceptes teòrics, així com a les principals fórmules que són necessàries per als càlculs i les llibreries numèriques del programari encarregat de efectuar les simulacions numèriques.

Al capítol 3, es documenta la execució del programari, així com les dificultats trobades. A continuació, dins del mateix capítol, es parla de les llibreries i funcions utilitzades durant el desenvolupament del treball incorporades al programari principal. Diferenciant la part estacionària, que correspondria a la aerodinàmica i la part transitòria, que correspondria a la part de aeroacústica.

Al capítol 4, es fa un seguiment de quins han estat els passos cronològics per al desenvolupament del treball i les diferents fases superades. Així com els canvis incorporats fins a arribar a la versió final que permet obtenir els resultats definitius a analitzar i discutir.

Al capítol 5, es mostren els resultats finals de les simulacions, tant per la part de aerodinàmica com de aeroacústica sense entrar a discutir els resultats en profunditat.

Finalment, a la part 6, que correspon a les conclusions, s'interpreten els resultats mostrats en l'apartat 5, donant un punt de vista crític i objectiu per poder avaluar, segons els objectius plantejats prèviament, si s'han pogut arribar a vàries conclusions o no, fent una menció important a diverses propostes per saber cap a on hauria d'anar un futur treball que continués a partir d'aquest i pugui completar els punts febles exposats a les conclusions.

1.4. Utilitat del treball

1.4.1. Plantejament del problema

El sector de l'automoció s'està redirigint cap a la producció de cotxes elèctrics [2] [3] [4], reinvertint els futurs models a híbrids o totalment elèctrics, això fa que, en els vehicles elèctrics

hi hagi una principal absència de soroll provinent del motor de combustió interna. Això provoca que siguin audibles altres sorolls que amb els vehicles de motor de combustió interna no eren tan apreciables. Amb aquesta situació canviant a la indústria, s'està destinant molt pressupost en investigació i desenvolupament per reduir els sorolls que arriben als ocupants d'aquests.

Juntament amb aquests desenvolupaments, hi ha grans marques d'automoció que estan presentant models de vehicles sense retrovisors convencionals, és a dir, una versió minimalista proveïda d'una càmera d'alta resolució capaç d'igualar i millorar els angles de visió respecte un retrovisor convencional [5].

Dit tot això, es pot considerar que, els retrovisors, al ser uns elements voluminosos en els vehicles, poden generar una pressió aerodinàmica que, en el plantejament d'aquest treball es vulgui estudiar quin efecte pot tenir en la generació de soroll a altes velocitats. El problema a resoldre és, demostrar si els retrovisors generen un soroll prou com per ser audible i molest per als ocupants en vehicles amb motor elèctric.

1.4.2. Estat de l'art i antecedents

La aeroacústica en els turismes s'ha estat desenvolupant amb més rellevància durant la última dècada. S'ha intentat arribar a conclusions i resultats que permetin identificar de manera matemàtica i experimental el comportament de l'aire i la pressió que exerceix sobre les diferents superfícies del vehicle així com en elements que sobresurten i irregularitats en la carrosseria del vehicle, com retrovisors laterals, les juntes entre panells de la carrosseria, antenes de radio, pneumàtics i altres elements que puguin generar un efecte turbulent i crear una pressió sobre aquest, que pugui generar un soroll molest per als ocupants. Per poder arribar a calcular aquests escenaris, es procedeix a instal·lar uns punts de mesura que actuen com a micròfons, que permeten, tant numèrica com experimentalment, tenir unes mesures que es poden interpretar.

L'estat de l'art d'aquest treball s'ha basat, principalment, en 8 articles relacionats de diferents maneres per donar una visió i unes bases per poder establir un modus operandi per arribar a uns resultats coherents i acordes amb aquests. Han estat els següents:

- Automotive aeroacustics: An Overview; d'en Nicholas Oettle i David Sims-Williams al 2017 [6]; on s'estudia i es comenta que, el rendiment aeroacústic dels vehicles té una forta influència en la percepció del client i també té importància per a la seguretat i la

comoditat. El rendiment del soroll del vent es diferenciava anteriorment per la qualitat del segellament dels panells de la carrosseria del cotxe així com del tancament entre elements, com siguin portes o finestres. Avui dia, aconseguir un rendiment competitiu del soroll del vent també depèn de minimitzar les fonts de soroll aeroacústiques generades per la forma del vehicle, i de l'atenuació en el trajecte del so des de les fonts externes fins a l'interior del vehicle; continuarà exercint un paper important en el control del soroll de cabina, amb un èmfasi especial en l'assoliment de l'atenuació de manera eficient en termes de quantitat de components. El cervell humà no només és sensible al ample de so, sinó a característiques distintives com la tonalitat o la modulació, que tenen una importància rellevant en l'ocupant del vehicle i impacten negativament en la percepció. Aquests factors més complexos sovint són necessaris per definir un bon rendiment per detectar el soroll del vent. Això inclou en consideració múltiples bandes de freqüència. Un punt clau per aconseguir el refinament del vehicle en el futur, és la comprensió de les condicions de flux no estable, el seu impacte en el nivell de pressió, i la modulació, al mateix temps, en la percepció psicoacústica.

- Calculation of external vehicle aerodynamic noise based on LES subgrid model; d'en Xingjun HU, Peng Guo, Zewei Wang, Jingyu Wang, Mo Wang, Jia Zhu i Dejiu Wu al 2020 [7]; on s'estudia i es comenta que, el model DSLM basat en el model de subxarxa Smagorinski-Lilly (SLM) s'ha introduït en el programari OpenFOAM, simulant així el camp de flux del vehicle i la corba del coeficient de pressió i la pressió sonora dels punts de control. Els resultats mostren que el model de subxarxa DSLM amb una funció de paret pot aconseguir una alta precisió de simulació. La investigació de l'estructura del camp de flux ha revelat una intermitència del camp de flux turbulent després que el flux d'aire passés a través del retrovisor, resultant així en una pulsació de pressió a la finestra lateral al voltant del retrovisor. El flux d'aire passa a través del pilar A del vehicle, adherit a la finestra superior, produint soroll aerodinàmic. Els resultats de la investigació poden servir com una bona referència per a la simulació i la prova de sorolls aerodinàmics fora del vehicle, i per a la reducció dels sorolls aerodinàmics dels vehicles.
- Direct aeroacoustics simulation of acoustic feedback phenomena on a side-view mirror; d'en Hannes M. Frank i Claus-Dieter Munz al 2016 [8]; on s'estudia i es comenta que, el flux al voltant d'un retrovisor i la seva generació de soroll s'investiga utilitzant LES i DNS. S'observa el to sonor, que s'origina a la vora posterior de la separació laminar, coincidint amb els resultats experimentals. Per tal de determinar la naturalesa de la generació del

to acústic, es fa una anàlisi d'estabilitat lineal i s'utilitza un enfocament de pertorbació global. La pertorbació l'anàlisi basada en tot el camp de flux demostra l'existència d'una inestabilitat global afectant el creixement de la pertorbació convectiva, dispersió acústica a les arestes de la geometria i receptivitat acústica a les vores arrodonides de separacions entre elements de la carrosseria del vehicle. Els resultats mostren el to acústic causat per l'anomenat bucle de retroalimentació acústica amb el qual es creen vòrtexs sobre si mateixos amb geometries com la del retrovisor.

- Direct noise computation of a generic vehicle model using a finite volume method; d'en Ali H. Dawi i Rinie A.D. Akkermans al 2019 [9]; on s'estudia l'aplicabilitat d'un mètode de volum finit per al càlcul directe del soroll dels vehicles. Per aquest propòsit, es considera un model de vehicle genèric que consisteix en els principals components aeroacústics d'un cotxe de producció. Aquests components són el pilar A i el retrovisor. El flux a través del model de vehicle es calcula utilitzant un càlcul de flux compressible per a fluxos de nombre de Mach baix, acompanyat d'un enfocament basat en DES per al model de turbulència. Es calculen dues variants del model de vehicle, amb i sense retrovisors. La validació dels resultats aerodinàmics es realitza comparant espectres simulats de pressió superficial a la finestra lateral amb les mesures del túnel del vent. A partir de llavors, s'examina la generació i propagació d'ones acústiques. Aquesta propagació a la superfície de les finestres es calcula directament utilitzant el càlcul de flux compressible, així com indirectament utilitzant un mètode d'integritat de superfície. Els resultats d'ambdós mètodes s'utilitzen com a entrada per a un model vibroacústic i es comparen els espectres d'acceleració de la superfície entre ambdós enfocaments i les mesures de túnel del vent. Es dona una avaluació general dels dos enfocaments numèrics i es presenta l'impacte aeroacústic del pilar A, així com el retrovisor en relació a la seva contribució al nivell acústic general.
- Spurious noise in direct computation with a finite volume method for Automotive applications d'en Ali H. Dawi i Rinie A.D. Akkermans al 2018 [10]; on es presenta un estudi sobre el soroll espuri generat en DNS utilitzant mètodes de volum finit. S'examinen les diferents fonts de soroll espuri, així com el mecanisme de la seva generació. El cas de prova implica un retrovisor muntat en una placa plana, que serveix per quantificar el nivell de soroll espuri produït i la seva rellevància en comparació amb el so físic generat pel flux passat del mirall. Els casos de prova es calculen utilitzant un càlcul de flux compressible per a fluxos amb un nombre Mach baix utilitzats amb un

enfocament DES per a flux turbulent. S'ha implementat un nou model d'amortiment acústic que elimina les ones acústiques sense afectar les fluctuacions turbulentes hidrodinàmiques. A més, es dona especial èmfasi a les interfícies de refinament. Com que no hi ha cap mesura disponible, els resultats del càlcul directe del soroll es comparen amb els resultats d'un mètode basat en la integral de Kirchhoff.

- General aspects of vehicle aeroacoustics d'en Martin Helfer al 2005 [11]; on s'estudia i es comenta que, el soroll emès pels vehicles de combustió comprèn bàsicament el soroll del motor, el soroll dels pneumàtics i el soroll aerodinàmic. A baixa velocitat i alta càrrega de motor és el soroll que domina. A velocitats baixes i amb una càrrega de motor baixa, els pneumàtics contribueixen a la major part del soroll general. Fins i tot en acceleració, aquest soroll pot tenir un paper dominant. A velocitats creixents, el soroll aerodinàmic del vehicle esdevé més significatiu a mesura que la seva potència acústica augmenta, mentre que el soroll dels pneumàtics augmenta menys proporcionalment. Mentre hi havia una major recerca per als motors i el soroll de rodada dels pneumàtics, la recerca i el desenvolupament intensiu en el camp del soroll aerodinàmic va començar posteriorment. En les primeres proves al 1983, es va detectar que a partir d'una velocitat aproximada de 130 km/h el soroll aerodinàmic reflectit era més alt que totes les altres fonts de soroll del vehicle combinades. L'ús de mètodes d'avaluació psicoacústica normalment fallava a causa del soroll de fons massa alt. Per tant, en els últims anys s'han posat en funcionament cada vegada més túnels de vent especialitzats. Això ha donat lloc a nous descobriments en el camp de la aeroacústica. També s'han realitzat exàmens considerant la rellevància del soroll aerodinàmic en relació amb el soroll global amb diversos vehicles. Les avaluacions espectrals mostren que la interferència a causa del soroll aerodinàmic pot ocórrer en vehicles de passatgers fins i tot a velocitats baixes. Utilitzant un cotxe de mida mitjana s'ha trobat, per exemple, que a més de 70 km/h el rang de freqüència entre 350 i 900 Hz està dominat pel soroll aerodinàmic.
- Wind noise – A dominant source for in-cabin noise in comparison to other noise sources of a vehicle; d'en Matthias Riegel al 2004 [12]; on seguint amb les línies d'investigació de l'article anterior, a mitjanes i altes velocitats, la font de soroll predominant és el vent que pressiona la superfície del vehicle, apart del motor, que tindria més rellevància com més alt de revolucions funcioni o més lent es circuli amb el vehicle, el propi paviment es un factor molt variant degut a la gran quantitat de paviments diferents i composicions que hi ha, així com l'estat en el que es trobi de conservació; és un factor rellevant a

l' hora de estudiar els efectes de la aeroacústica de manera experimental en un túnel del vent, ja que els valors podran distar bastant d'una situació en un entorn de moviment del vehicle. A velocitats mitjanes, el soroll del vent és el més destacat a freqüències per sobre de 2000 Hz, independentment del paviment, sent rellevant també a baixes freqüències sonores.

- Implementation of aeroacoustics methods in OpenFOAM; d'en Erika Sjöberg al 2016 [13]; on s'estableix un mètode general per a fluxos amb un nombre de Mach baix que s'utilitzen analogies aeroacústiques per desacoblar la generació de so de la propagació del so. El càlcul de CFD en OpenFOAM s'utilitza per calcular les fonts de so induïdes pel flux i l'analogia acústica Ffowcs-Williams i Hawkings s'implementa per calcular la propagació del so. Les dades d'origen incompressible i compressible es recullen per a un cas de prova i després d'avaluar l'emissió de soroll, la suposició d'incompressibilitat demostra ser vàlida per a un flux amb un nombre de Mach baix. A més, l'avantatge de les condicions de frontera no-reflectores en OpenFOAM és apta i es troba que és eficaç. Finalment, el mètode es prova en un retrovisor i es troba que els resultats estan d'acord amb estudis anteriors d'aquest mateix treball.

2. BASE TEÒRICA

2.1. Equacions fonamentals de la mecànica de fluids

És necessari explicar breument quina és la base matemàtica amb la qual es fonamenta el càlcul computacional de la dinàmica de fluids (CFD). Les equacions de Navier-Stokes, que es basen en intentar explicar el comportament de la mecànica de fluids; és una branca de la física, que s'encarrega del moviment i interacció d'un gran nombre d'elements individuals que en aquest cas són molècules i àtoms.

Se suposa que la densitat del fluid és prou gran com per a poder aproximar-la a un mitjà continu, d'aquesta manera, qualsevol porció infinitesimal de fluid conté el suficient nombre de partícules per a poder definir una velocitat i fins i tot una energia cinètica mitjana en l'element infinitesimal. En mecànica de fluids, es defineixen unes variables i propietats que són mitjana d'un volum infinitesimal, considerant-les com a propietats en cada punt del fluid.

L'obtenció de les equacions de la mecànica de fluids es basa en el fet que el comportament dinàmic del fluid és governat per les següents equacions de conservació:

- La conservació de la massa o equació de continuïtat.
- La conservació del moment cinètic o de la continuïtat de moviment.
- La conservació de l'energia.

La conservació d'una magnitud fluida implica l'estudi d'aquesta magnitud a l'interior d'un volum de control definit prèviament, tenint en compte, la variació a través del contorn, l'increment de la magnitud fluida deguda a fonts i forces internes, i l'efecte de forces externes actuant sobre el volum considerat. El pas per unitat de temps d'una magnitud a través del contorn es denomina flux. En general, el flux pot ser descompost en dos termes: un a causa del transport convectiu i un altre causat pel moviment molecular considerant el fluid en repòs, anomenat transport difusiu (proporcional al gradient de la magnitud considerada).

Amb la forma integral de les equacions de Navier-Stokes, es poden identificar:

Equació de conservació de la massa. Equació de continuïtat.

En el principi de conservació de la massa en fluids monofàsics no existeix la contribució del terme difusiu en l'equació de continuïtat, la qual cosa indica que per a qualsevol fluid en repòs, la variació de la massa implica un desplaçament de les partícules fluides. La magnitud que es conserva en aquest cas és la densitat. En l'estat estacionari no existeixen forces de volum o de superfície actuant sobre el domini. Obtenim doncs l'equació (2.1):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = 0 \quad (2.1)$$

Equació de conservació de la quantitat de moviment.

Per obtenir l'equació del moment s'ha de començar recordant la forma particular de la segona llei de Newton, la qual estableix que la variació del moment és la conseqüència del sumatori de totes les forces que actuen sobre un element.

El flux difusiu és zero, fet que no fa possible la difusió del moment en un fluid en repòs. Es poden diferenciar dos tipus de forces que actuen en un volum de control:

Forces de volum: són les que actuen directament sobre la massa del volum. Per exemple, la força de la gravetat, de Coriolis, centrífuga, i fins i tot degudes al camp electromagnètic.

Forces de superfície: són les que actuen directament sobre la superfície que delimita el volum de control. Aquestes forces provenen de dues possibles fonts: la distribució de pressions (imposada pel fluid que envolta al volum de control) i les tensions normals i tangencials (resultants de la interacció del fluid amb les superfícies que delimiten el mateix).

Per tant, la suma de totes les contribucions amb el principi general de conservació, s'obté la equació (2.2):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\Omega} \rho \vec{f}_e d\Omega - \oint_{\partial\Omega} p \vec{n} dS + \oint_{\partial\Omega} (\vec{\tau} \cdot \vec{n}) dS \quad (2.2)$$

Equació de conservació de la energia.

Es basa en el primer principi de la termodinàmica. Si s'aplica aquest principi a un volum de control, expressa que la variació temporal de l'energia total en el volum de control és igual a l'increment de treball de les forces que actuen sobre el volum i el flux net de calor a través del contorn del domini.

S'ha de tenir present que es pot trobar l'equació de l'energia de manera general utilitzant l'entalpia E, però el seu ús més extens i més ben adaptat és fent la conversió a entalpia total [14].

$$H = h + \frac{|\vec{v}|^2}{2} = E + \frac{p}{\rho} \quad (2.3)$$

Aplicant l'equació (2.3), queda finalment expressada segons l'equació (2.4) següent:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \rho H (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{\Omega} (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + \dot{q}_h) d\Omega + \oint_{\partial\Omega} k (\nabla T \cdot \vec{n}) dS + \oint_{\partial\Omega} (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n} dS \quad (2.4)$$

A dia d'avui, no s'ha trobat una solució analítica per a aquestes equacions, per la qual cosa, per fer-ne ús, en algun moment s'han de fer assumpcions i aproximacions. L'estratègia per poder trobar una solució és en el que es basa el CFD. Amb això es pot fer una primera aproximació àmpliament acceptada dient que: la massa, el moment i l'energia no es poden crear ni destruir, només transformar-se.

A partir d'això, es pot establir la llei de conservació de la massa, el moment i l'energia. Abans d'això però, N-S es refereix a un volum de control, pel qual, totes les propietats es divideixen per aquest volum de control. Per exemple, la massa serà substituïda per la densitat, el moment per la unitat volum, etc.

Si s'aplica el principi abans nombrat, s'arriba al plantejament de simplificar les equacions per a cada cas i situació del fluid. De tal manera que queden 5 variables i 4 equacions per resoldre. L'única manera a dia d'avui d'intentar treballar amb aquestes equacions és afegir noves variables per intentar minimitzar l'error. Per tant, es podria dir que el CFD es basa en prendre les decisions adequades per a cada escenari de simulació per tal de simplificar les equacions de N-S sense incórrer a un gran error [15].

2.1.1. Flux turbulent

El comportament dinàmic del fluid per un cas com el plantejat en aquest document, estableix que el flux extern al voltant d'un turisme a velocitat constant és, o bé laminar o bé turbulent. En el règim de flux laminar les capes adjacents de fluid passen per davant d'una manera ordenada i el flux és suau. No obstant això, a velocitat constant i de circulació habitual d'un turisme, la

major part del flux extern és turbulent. La turbulència és un estat caòtic d'un fluid amb canvis de propietat estocàstica, incloent-hi una ràpida variació de la pressió i la velocitat. Un altra característica important del flux turbulent és l'augment de la difusivitat. El flux incompressible turbulent es pot descriure completament amb les equacions de N-S i l'equació de continuïtat, tal i com es pot veure de manera molt breu i resumida en la equació (2.5) a continuació.

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial v_i v_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$$

2.1.2. Coeficients aerodinàmics i forces

Un cop definides les equacions fonamentals, cal explicar que per a poder quantificar i valorar els resultats numèrics de les simulacions de la part d'aerodinàmica, existeixen unes forces que deriven dels models matemàtics que s'han comentat. Permetent així, tenir uns valors numèrics quantificables per a poder determinar com està interactuant el fluid amb la superfície de contacte.

Coeficient de arrossegament (Cd)

El coeficient d'arrossegament és una mesura important en el disseny d'automòbils, ja que la millora de l'eficiència de combustible (almenys a velocitats més altes) és una conseqüència directa d'un coeficient d'arrossegament baix. L'arrossegament s'especifica com la força de resistència d'un objecte que es mou a través d'un entorn fluid, com l'aigua o l'aire. La força d'arrossegament consisteix principalment en dues contribucions diferents, una força de pressió a causa de la forma de l'objecte i una força viscosa a causa de la fricció superficial. Per als avions, la força d'arrossegament està dominada per les forces viscoses, mentre que per als cossos més angulosos, com els cotxes, les forces de pressió són molt més importants.

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \quad (2.6)$$

L'equació (2.6) mostra com es calcula el coeficient d'arrossegament. La força d'arrossegament "D" es divideix per la pressió dinàmica multiplicada per l'àrea projectada "A" en direcció "X". Els valors típics per al coeficient d'arrossegament varien actualment entre 0.25 i 0.35, com es veu

en línia a la pàgina web [16]. Com que el coeficient d'arrossegament depèn de la forma, és fàcil imaginar que els turismes normalment es troben a l'extrem inferior del rang, mentre que els SUV dominen l'extrem superior.

Coefficient de sustentació (C_l)

El coeficient de sustentació es defineix de manera similar al coeficient d'arrossegament. El coeficient està directament relacionat amb la força en direcció a l'eix "Z". Coneixent la força de sustentació, es pot calcular el coeficient de sustentació segons l'equació (2.7):

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A} \quad (2.7)$$

Per conveniència, la definició conté l'àrea frontal projectada, mentre que la força d'elevació estaria més relacionada amb l'àrea inferior projectada. Els valors típics per al coeficient de sustentació són avui dia al voltant de 0 per a cotxes idealment dissenyats. S'ha de ser conscient que per als vehicles esportius els coeficients d'elevació negatius són normals, produïts per una força d'elevació negativa. Aquesta força d'elevació negativa es coneix normalment com a "downforce" o efecte terra i és beneficiosa per que permet velocitats més altes de pas de corba. Normalment la força d'elevació és diferent per a l'eix frontal i posterior i, en conseqüència, el coeficient d'elevació també és diferent. Les contribucions frontals i posteriors es sumen per donar el valor total conegut. Es podria considerar que un valor lleugerament negatiu és bo per al comportament del vehicle, degut a que permet mantenir un lleugera adherència extra del vehicle amb la carretera [17].

2.2. CFD – Dinàmica de Fluids Computacional

2.2.1. Mètode de Volums Finit

És un mètode per representar i avaluar equacions diferencials parcials en equacions algebraiques. "Volum finit" es refereix al petit volum que envolta a cada punt del node en una malla. En el mètode de volums finits, les integrals de volum d'una equació diferencial parcial que contenen un terme de divergència es converteixen en integrals de superfície, utilitzant el teorema de la divergència. Aquests termes s'avaluen llavors com a fluxos en les superfícies de

cada volum finit. Com el flux que entra en un volum determinat és idèntic al que surt del volum adjacent, aquests mètodes són conservadors. Un altre punt clau del mètode de volums finits és que es formula fàcilment per a permetre malles no estructurades. Aquest mètode s'utilitza en molts paquets de CFD.

Els mètodes de volum finit poden comparar-se i contrastar-se amb els mètodes de diferències finites, que aproximen les derivades utilitzant valors nodals (anàlisi per nodes), o amb els mètodes d'elements finits, que creen aproximacions locals d'una solució utilitzant dades locals, i construeixen una aproximació global unint-les. Per contra, un mètode de volums finits avalua expressions exactes per al valor mitjà de la solució en un determinat volum, i utilitza aquestes dades per a construir aproximacions de la solució dins de les cel·les [18].

Discretització espacial

S'utilitza l'equació general de transport com a punt de partida per a explicar el MVF. Es vol resoldre l'equació general de transport per a la quantitat transportada en un domini donat, amb condicions de frontera donades i condicions inicials.

$$\int_{V_P} \underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV}_{\text{temporal derivative}} + \int_{V_P} \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \phi) dV}_{\text{convective term}} - \int_{V_P} \underbrace{\nabla \cdot (\rho \Gamma_\phi \nabla \phi) dV}_{\text{diffusion term}} = \int_{V_P} \underbrace{S_\phi(\phi) dV}_{\text{source term}} \quad (2.8)$$

Es parteix de l'equació (2.8) de segon ordre. Per a una bona precisió, cal que l'ordre de la discretització sigui igual o superior a l'ordre de l'equació que està sent discretitzada. A partir d'aquesta equació es podem escriure les equacions de N-S.

Es divideix el domini de la solució en un nombre finit de volums de control arbitraris o cel·les, dins de cada volum de control es busca la solució. Els volums de control poden ser de qualsevol forma (per exemple, tetràedres, hexàgons, prismes, piràmides, dodecàedres, etc.). L'únic requisit és que els elements han de ser convexos i les cares que componen el volum de control han de ser planes.

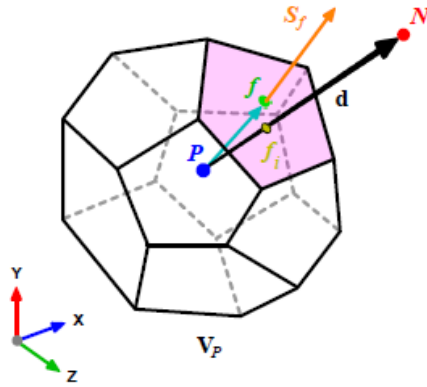


Figura.: 1: Volum de control o cel·la tipus [19]

S'assumeix que els valors de totes les variables estan calculades i emmagatzemades fent referència la punt P central del volum de control.

El teorema de divergència simplement afirma que el flux extern d'un camp vectorial a través d'una superfície tancada és igual a la integral de volum de la divergència sobre la regió dins de la superfície. Aquest teorema és fonamental en el MVF, s'utilitza per convertir les integrals de volum que apareixen en integrals de superfície.

Els valors de la cara que apareixen en els fluxos convectius i difusius han de ser calculats per alguna forma d'interpolació dels valors centrals "P" dels volums de control a ambdós costats de la cara "f".

El flux convectiu es pot calcular utilitzant un esquema d'interpolació de segon ordre, que es coneix com a interpolació lineal o interpolació central. No obstant això, pot generar solucions oscil·lants (solucions no limitades).

També es pot calcular amb un esquema d'interpolació de primer ordre. Aquest esquema és fitat (no oscil·lador) i difusiu.

Per prevenir oscil·lacions en les solucions, s'afegeixen limitadors de gradient.

Discretització temporal

Després de la discretització espacial, s'ha de considerar la discretització temporal per poder desenvolupar la part de aeroacústica.

Utilitzant les equacions prèviament comentades com la (2.8), fent ús de la següent expressió com a flux convectiu:

$$\mathbf{S} \cdot (\rho \mathbf{u} \phi) = F^C \quad (2.9)$$

I també fent ús de la següent expressió com a flux difusiu:

$$\mathbf{S} \cdot (\rho \Gamma_\phi \nabla \phi) = F^D \quad (2.10)$$

La equació general del transport de manera semi-discreta avaluada pel temps queda així:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} \right)_P V_P + \sum_f \mathbf{S}_f \cdot (\rho \mathbf{u} \phi)_f - \sum_f \mathbf{S}_f \cdot (\rho \Gamma_\phi \nabla \phi)_f \right] dt \quad (2.11)$$

$$= \int_t^{t+\Delta t} (S_c V_P + S_p V_P \phi_P) dt.$$

En aquesta etapa, es poden utilitzar diversos esquema de discretització del temps, per exemple, Crank-Nicolson o Euler. Cal assenyalar que l'ordre de la discretització del terme transitori no ha de ser el mateix que el de la discretització dels termes espacials. Cada terme es pot tractar de manera diferent per tenir diferents precisions. Mentre els termes individuals siguin almenys de segon ordre, la precisió general també serà de segon ordre [19].

2.2.2. Simulació numèrica directa (DNS)

En aquest cas, les equacions de N-S es resolen directament sense cap model de turbulència, tant per aeroacústica com per aerodinàmica. Això proporciona uns resultats més precisos però és necessari resoldre totes les escales espacials i temporals al detall.

L'emissió de so es pot avaluar en qualsevol lloc en el camp de flux però amb una gran demanda de potencia computacional. Requereix una quadrícula computacional que resolgui tot l'abast.

Degut a la gran quantitat de punts a la malla del cas a resoldre, és un mètode limitat a números de Reynolds molt baixos. Només s'utilitzarà aquest tipus de resolució, per a casos molt puntuals a nivell acadèmic teòric. Per a casos normals d'enginyeria, se solen utilitzar els casos com RANS o LES [17] [13].

2.2.3. Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

És una versió de temps mig de les equacions de N-S. Per reduir el cost de computació, el vector velocitat i la pressió són dividits a un estat estacionari (aproximació temporal) i a una part fluctuant.

$$u_i = U_i + u_i' \quad p = P + p' \quad (2.12)$$

La descomposició es coneguda com a descomposició de Reynolds segons els termes de l'equació (2.12); incorporant els components de la velocitat i pressió a les equacions de N-S per a flux incompressible, resulta en:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (2.13)$$

En l'equació (2.13), el terme nou que apareix a la dreta és desconegut i representa un tensor d'estrès addicional a causa de velocitats fluctuants, conegut com a tensor d'estrès de Reynolds. Com que el tensor d'estrès de Reynolds és desconegut, condueix a l'anomenat problema de tancament, on hi ha deu incògnites, però només quatre equacions. Per tant, les tensions de Reynolds han de ser modelades per tal de tancar el sistema d'equacions. Ja el 1877, els primers intents de descriure les tensions turbulentes van ser realitzats per Boussinesq, que va introduir el concepte de viscositat de Eddy. Aquest concepte va tenir un gran èxit i és àmpliament conegut com l'aproximació de Boussinesq.

En models d'una equació, es resol la equació de transport amb flux turbulent. No obstant això, el model Spalart-Allmaras és considerat com el més precís i resol l'equació de transport per a una variable de velocitat similar a la viscositat. Els models de turbulència de dos equacions són els més utilitzats. Solucionen l'equació de transport per a l'energia cinètica turbulenta i l'equació de transport per a flux turbulent [17] [13].

2.2.4. Large Eddy Simulations (LES)

LES és una altra manera de resoldre les equacions de N-S. Al 1970, Deardorff va publicar els primers resultats d'una Simulació en LES i ara la tècnica ha madurat bastant. No només la teoria subjacent ha avançat, sinó també el poder de computació disponible ha augmentat. Al 1941, Kolmogórov va publicar la seva teoria de similitud, que implica que els Eddy més grans d'un flux depenen de la geometria de flux, mentre que els petits Eddy són similars i més universals. Per tant, amb LES, l'energia que conté grans Eddy es calcula explícitament, mentre que els Eddy que són més petits que l'amplada del filtre es tracten implícitament amb un model de sub-graella. Suposant que les petites escales siguin més homogènies i menys afectades per les condicions de frontera, s'espera que els models més simples en comparació amb RANS siguin suficients. Per tal de distingir entre escales resolubles i sub-graella, s'ha d'aplicar algun tipus de filtratge a les equacions de N-S. Els filtres populars en LES són, per exemple, el de Fourier i el de Gauss.

Explicat d'una altra manera, en LES els moviments a gran escala (eddies grans) del flux turbulent es calculen directament i només es modelen els moviments a petita escala (escala de sub-graella (SGS)), resultant en una reducció significativa en el cost computacional en comparació amb el DNS. LES és més precís que l'enfocament RANS, ja que els grans eddies contenen la major part de l'energia turbulenta i són responsables de la major part de la transferència de moment. LES captura directament aquests eddies en detall, mentre que són modelats en aproximacions en RANS. A més, a escales petites tendeixen a ser més isotròpics i homogènis que els grans i, per tant, poder modelar els moviments SGS haurien de ser més fàcils que modelar totes les escales dins d'un sol model com en l'enfocament RANS. Per tant, actualment LES és l'eina numèrica més viable per simular fluxos turbulents de manera realista.

Un terme important per a les simulacions transitòries és el nombre CFL (Courant-Friedrichs-Lewy), que de vegades també es coneix com el nombre Courant. Es pot veure com un criteri d'estabilitat per a simulacions transitòries amb un temps explícit.

$$Co > \frac{U\Delta t}{\Delta x} \quad (2.14)$$

A l'equació (2.14), l'"U" és la velocitat local, Δt és la mida del pas temporal i Δx és la resolució de la quadrícula. Per tal de tenir estabilitat, el nombre de Courant hauria d'estar normalment per sota d'1 per a cada cel·la. Com que la malla i la velocitat són paràmetres donats, l'única possibilitat de manipular el nombre de Courant és amb la mida interval de temps de simulació.

Això pot ser una restricció molt limitada en el temps necessari per realitzar una simulació. Una explicació física podria ser dir que el nombre Courant determina quantes cel·les de la malla passa un element fluid durant un instant de temps [17].

2.3. AAC – Aeroacústica Computacional

2.3.1. Introducció

La aeroacústica es podria definir breument com una branca de l'acústica que estudia la generació de sorolls per qualsevol moviment o interacció del flux de fluids amb sòlids.

Mentre que l'acústica s'ocupa de l'estudi de les ones mecàniques i la seva propagació dins d'un medi estable, la aeroacústica és la ciència que estudia el so aerodinàmic que es genera per fluxos transitoris i/o turbulents i amb la seva interacció amb les superfícies dels cossos. Per tant, la mecànica de fluids és necessària per estudiar el moviment del fluid, així com les seves forces internes i com amb el seu moviment es pot generar so aerodinàmic.

A mitjans del segle XX, la aeroacústica es va convertir en un camp de recerca quan Michael James Lighthill va publicar articles sobre la generació de so aerodinàmic. La investigació de Lighthill es va centrar en l'estudi del so generat per un avió comercial, ja que aquest tipus de motors són responsables d'alguns dels sorolls més intensos [20].

Una de les primeres teories de la aeroacústica és l'anomenada analogia de Lighthill (de la qual es parlarà en més profunditat més endavant en aquest treball), que va desenvolupar utilitzant les equacions de N-S que indiquen una relació directa entre el so emès pel fluid i les fonts de quadrupols que són produïdes per la turbulència del fluid. Un any més tard, Curle va trobar una solució formal de l'analogia de Lighthill que té en compte superfícies dures dins del domini, que també es parlarà en més profunditat en aquest mateix capítol del treball.

2.3.2. Física del so

El so és la vibració en un gas elàstic o un fluid associat a oscil·lacions de pressió i densitat. Aquestes vibracions es propaguen en forma de ones longitudinals a partir d'expansions i compressions adiabàtiques a través del medi.

En el so, principalment, es tenen en compte diverses variables:

- **L'amplitud:** pressió màxima que pot assolir la oscil·lació, a major amplitud, major so.
- **Freqüència:** nombre de cicles de variació de pressió per unitat de temps.
- **L'ample de banda:** distància que pot recórrer una ona en una unitat de temps.
- **La velocitat de propagació:** depèn de la temperatura i ve de la equació de gasos ideals. En condicions normals equival a 343 m/s.

La variable que caracteritza la potència del so com a valor global és el Nivell de Pressió Sonora o SPL, i es calcula de la següent manera:

$$SPL = 20 \cdot \log \left(\frac{P_{rms}}{P_o} \right) \quad \text{where } P_o = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \quad (2.15)$$

El valor de la pressió base, (P_o) en l'equació (2.15), s'usa per ser el valor màxim audible pels éssers humans. Amb el SPL, s'usa la freqüència per veure l'espectre sonor.

Apart dels tons purs, normalment els sons quotidians estan superposats de tons purs a diferents freqüències. El so s'analitza per intervals, i cada interval correspon a una banda d'octava i la seva freqüència màxima és dues vegades la inferior de la mateixa banda.

Tenint en compte això últim, si es vol determinar un nivell global de so per a un espectre, degut a la seva naturalesa logarítmica, s'ha de fer la mitjana de manera especial [20]:

$$L_p = 10 \log \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{P_{ref}} = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{\frac{P_i}{10}} \quad (2.16)$$

Psico-acústica

Dins de la física del so, hi ha un criteri establert com a psicoacústica, que és la relació entre els decibels reals i la percepció física humana a aquests decibels, veient clarament com, els éssers humans som molt més sensibles a freqüències superiors a 100 Hz i inferiors a 6000 Hz [21].

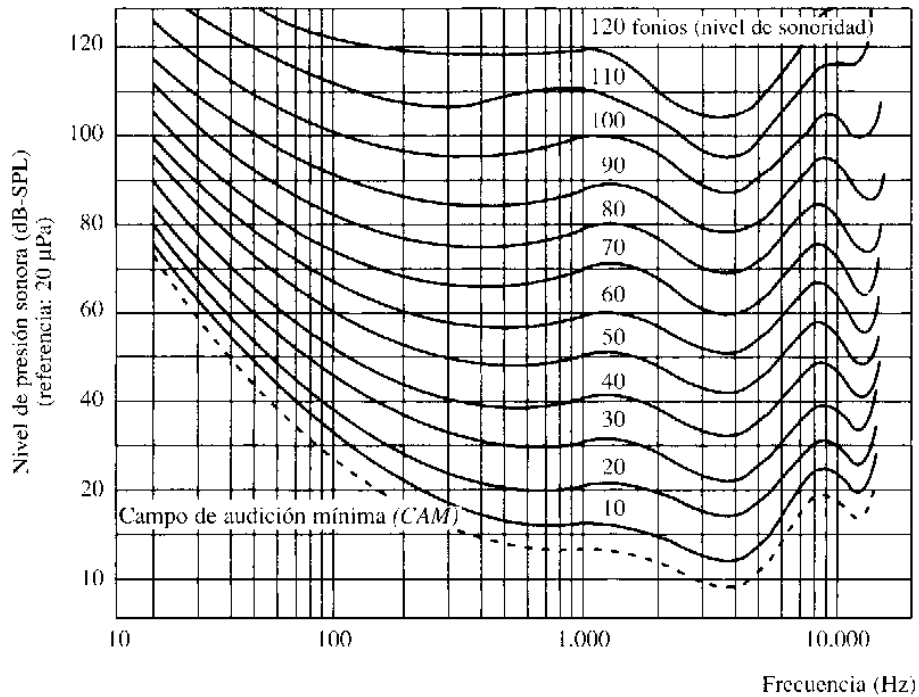


Figura.: 2: Corbes de igual sonoritat [21]

Aquest punt és clau per poder interpretar l'equivalència entre el SPL i la pressió que acaba sent percebuda física i psíquicament per l'oient. Aquesta intensitat percebuda és mesura en fonis. Per exemple, un so a una freqüència de 100 Hz i a uns 40 dB, seria percebuda pels humans equivalent a 20 fonis, que serien els 20 dB psicoacústics equivalents.

2.3.3. Transformada de Fourier (FFT)

És un transformada matemàtica en que es descompon la funció, la qual està usualment referenciada temporalment a un àmbit de freqüències. Quan un senyal de so és transformat al domini de la freqüència per la FFT, es parteix en tons purs. Per això, és un mètode útil i molt utilitzat en acústica per comparar i caracteritzar sons diferents.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-i\omega t) \cdot dt \quad (2.17)$$

Degut a la naturalesa integral de l'equació (2.17) de FFT, quan s'ha d'aplicar en programes informàtics, no es pot resoldre per que no presenta un comportament continu.

El so digital es presenta com una seqüència de valors discrets, de manera que no es pot aplicar tal qual i s'ha de fer mitjançant la transformada de Fourier Discreta (DFT). La qual transforma els

sons digitals discrets a N-valors equidistants a una complexa equació que depèn de la freqüència, definida tal que:

$$\begin{aligned}
 X_k &= \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-\frac{i2\pi}{N}kn} \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) - i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

Aquest model matemàtic aconsegueix reduir la complexitat de la computació del DFT i permet un procés de càlcul més ràpid. En altres paraules, si un senyal digital és avaluat utilitzant el mètode DFT necessitaria N^2 , mentre que un algoritme de FFT necessitaria $N \cdot \log(N)$. No obstant això, si s'utilitza la FFT s'han de prendre algunes suposicions. El senyal que s'ha de processar ha de ser finit, periòdic i el valor inicial i final ha de ser el mateix [20].

2.3.4. Teorema de Nyquist

Continuant amb el processament del senyal, és rellevant determinar una freqüència de mostreig correcta per tal de representar amb èxit el senyal de pressió acústica. El mostreig és el procés de convertir un senyal continu en el temps en una seqüència de valors que representen la mateixa funció original però discretitzada en el temps. La freqüència de mostreig determina quants punts s'utilitzen per representar el senyal continu i, per tant, per evitar possibles solapaments.

Es pot donar el cas que dos senyals tenen els mateixos valors en els instants de mostreig, encara que són completament diferents. Aquest fenomen es coneix com solapament i és causat perquè la taxa de mostreig no és prou alta per representar amb èxit el senyal real. Per evitar-ho, s'aplica el teorema de mostreig de Nyquist-Shannon. Aquest teorema estableix una condició suficient per a una taxa de mostreig que permeti capturar al complet tota la informació d'una senyal continua al temps en una banda de senyal finita. Per fer-ho, la taxa de mostreig ha de ser almenys el doble del component de freqüència més alta del senyal [20].

$$f_{max} = f_{Nyquist} \leq \frac{f_s}{2}
 \tag{2.19}$$

2.3.5. Simulació numèrica directa (DNS)

La simulació numèrica directa o DNS, tal i com s'ha vist anteriorment per al càlcul del flux amb les equacions de N-S; també s'utilitza per a la aeroacústica. Cal recordar que les fluctuacions del flux que generen els efectes acústics no són viables a nivell de cost de computació per tractar grans volums de valors o casos mínimament complexes. Amb això, s'han desenvolupat altres mètodes per intentar lidiar amb aquestes limitacions de complexitat de càlcul.

Aquest és el cas de les analogies que deriven de les equacions de N-S per a fluxos compressibles. Les quals es reorganitzen per tenir les equacions d'ona acústica, on a la part dreta d'aquestes equacions, consisteix en la fluctuació de la pressió i la velocitat, així com els termes del tensor d'estrès i la força i es coneix com a terme font ("source") i descriu les fonts acústiques. La manera en com són generades les fonts sonores, farà que tinguin una forma i una qualitat concreta.

Poden ser:

- **Monopols:** és una font sonora que irradia so en totes les direccions i crea una ona de so introduint i eliminant fluid a l'àrea circumdant i pot ser creada pel desplaçament del fluid.
- **Dipol:** és el resultat de la superposició de dues fonts monopol d'igual força però en fase oposada. Està relacionat amb diverses forces frontereres que actuen sobre el fluid.
- **Quadripol:** és el resultat de la superposició de dues fonts dipol d'igual força però en fase oposada. Aquesta font està relacionada amb la variació de les forces de volum dins del fluid o el gas [20].

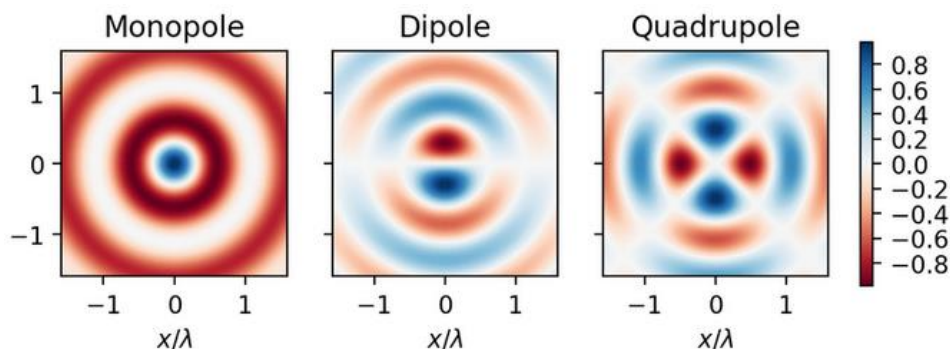


Figura.: 3: Representació gràfica de les fonts sonores [19]

2.3.6. Analogia de Lighthill

Lighthill va desenvolupar la primera equació que connectava la mecànica de fluids amb la acústica. Per fer-ho, comença amb les equacions de continuïtat (2.1) i de momentum (2.2) de Navier-Stokes.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i) = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \nabla \cdot (\rho u_i u_j + P_{ij}) = 0 \quad (2.21)$$

$$P_{ij} = p \delta_{ij} - \tau_{ij} \quad (2.22)$$

On en l'expressió (2.22) es descriu el tensor d'estrès compressiu que representa la pressió sobre el fluid.

Procedint amb l'analogia, la equació de ona no homogènia es pot descriure tal que:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \Delta \rho = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2.23)$$

Que deriva amb la fórmula coneguda com el Tensor de Lighthill:

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + \delta_{ij} (p - c_0^2 \rho) - \tau_{ij} \quad (2.24)$$

L'equació d'ona representa la propagació acústica, així com les fluctuacions de densitat de flux turbulent, ja que deriva directament de les equacions de N-S per a fluxos compressibles. Fins i tot per un soroll molt intens, les fluctuacions de pressió són molt petites en comparació amb la pressió atmosfèrica. Per tant, eliminant totes les derivades de valor constant i assumint que els productes de dues quantitats de fluctuació són bastant petits, l'equació (2.22) es pot reescriure com:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \Delta \rho' = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2.25)$$

Amb,

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + \delta_{ij}(p' - c_0^2 \rho') - \tau_{ij} \quad (2.26)$$

Tenint en compte que $p' = c_0^2 \rho'$, a la dreta de l'equació (2.25) es pot reescriure de tal manera que queda la forma final de l'analogia de Lighthill.

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \Delta p' = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2.27)$$

Per a la equació (2.26), el primer terme és el tensor no lineal d'estrès de Reynolds, que és el més important en la regió turbulenta del flux. El segon terme representa els monopols directament relacionats amb la generació d'entropia. L'últim i tercer terme és el tensor d'estrès viscos, que té un paper d'atenuació de so. Algunes simplificacions de l'expressió del tensor de Lighthill es poden fer en funció de la situació que s'estudia. S'acostuma a utilitzar per a models computacionals on el so generat es dona a números Mach petits i grans números de Reynolds.

L'analogia de Lighthill considera el flux lliure, com per exemple en un motor a reacció d'un avió. Les fluctuacions no estacionàries del flux estan representades per una distribució de fonts quadripolars en el mateix volum [20] [22].

2.3.7. Analogia de Curle

L'analogia de Curle és una extensió de la teoria de la aerodinàmica del so de Lighthill, i incorpora els sòlids del voltant com a superfícies generadores de so. Curle va resoldre l'equació de Lighthill per a casos concrets, de tal forma que la solució formal a aquesta és:

$$\rho - \rho_0 = \frac{1}{4\pi c_0^2} \int_V \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial y_i \partial y_j} \frac{dy}{|x-y|} + \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{1}{r_n} \frac{\partial \rho}{\partial n} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial r}{\partial n} \rho + \frac{1}{c_0 r} \frac{\partial r}{\partial n} \frac{\partial \rho}{\partial t} dS(y) \quad (2.28)$$

Al cantó dret de l'equació (2.28), el segon terme, inclou la distribució dels dipols al llarg de la superfície del sòlid a estudiar. A partir de l'equació (2.28), Curle va ser capaç de demostrar que podia ser transformada a:

$$\begin{aligned} \rho - \rho_0 &= \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij}(y, t - \frac{r}{c_0})}{r} dy + \frac{\partial}{4\pi c_0^2 \partial x_i} \int_S \frac{1}{r} l_j p_{ij} dS(y) \\ &= \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij}(y, t - \frac{r}{c_0})}{r} dy - \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{P_i(y, t - \frac{r}{c_0})}{r} dS(y) \end{aligned} \quad (2.29)$$

On “P” és la força que exerceix la superfície del sòlid i “y” és la posició del observador. El tensor d’estrès de Lighthill i la pressió estan avaluades amb un cert retard, que és el considerat que tarda en viatjar la pertorbació fins a la posició del observador. L’equació (2.29) és la solució amb consideració de quadripols, que considera el dipol originat per les interaccions del fluid amb els límits sòlids dins del domini.

Sota algunes hipòtesis aplicables en aquest cas d’estudi, es pot simplificar l’equació (2.29) d’aquesta manera:

- Les fonts volumètriques són negligibles.
- El flux és isentròpic.
- Els efectes del fluid compressible són negligibles.
- El temps de retard és negligible, els sòlids han de ser compactes, és a dir, no han de fer-se interferències entre ells mateixos.

Tenint en compte aquestes premisses, l’equació (2.29) es pot simplificar en:

$$p' = \frac{1}{4\pi c_0 r^2} \frac{\partial F_i}{\partial t} \quad (2.30)$$

On:

p' = Pressió acústica (Pa o m^3/kg).

c_0 = Velocitat del so estàndard (m/s).

r = Vector distància del observador a la font sonora (m).

F = Força (N o m^3/kg).

t = temps (s).

L’equació (2.30) és vàlida per a fluxos incompressibles de baixa velocitat i les superfícies dins del domini han de ser no deformables i sense moviment. A més, com diu Curle, les fonts dipol són dominants per a baixes velocitats i baixos fluxos de turbulència i, per tant, les fonts quadripols poden ser obviades [20] [23].

3. PROGRAMARI CFD

3.1. OpenFOAM

3.1.1. Per què OpenFOAM

OpenFOAM, significa originalment en anglès “Open Field Operation and Manipulation” és un software de CFD gratuït i de codi obert, llançat i desenvolupat a partir del 2004. Compta amb una gran base d’usuaris de la majoria de àrees de enginyeria i ciències. Està organitzat per un conjunt de mòduls en codi C++; aquest ús de la biblioteca C++ és utilitzada principalment per crear executables, coneguts com a aplicacions. Es distribueix amb un gran conjunt d'aplicacions ja compilades de mostra, però els usuaris també tenen la llibertat de crear les seves pròpies o modificar les existents.

Per aquesta recerca s’ha utilitzat la versió 2006 del Grup ESI (Engineering System International), principalment és degut a ser de codi obert, tenir el reconeixement mundial del seu rigor matemàtic i computacional, i per que aquesta versió en concret té el mòdul compilat per al càlcul de Curle, necessari per a la aeroacústica. El fet de ser de codi obert fa que tingui una clara avantatja econòmica respecte a altres programes com ANSYS, on la llicència té un cost de entre 10.000 i 50.000 € [24] [25].

3.1.2. Primers passos

Assumint la correcta instal·lació i funcionament del programari (per a més informació detallada del procés d’instal·lació del OpenFOAM en un entorn Windows 10, consultar l’**Annex A**, en el document adjunt ANNEX), cal destacar les principals premisses per desenvolupar el treball, quins han estat els recursos tècnics i quins els primers passos abans de començar a desenvolupar la part més tècnica. És molt rellevant aquest punt en aquest treball per que l’aprenentatge ha estat una gran part de les hores de desenvolupament del treball, així com els recursos utilitzats i disponibles.

Durant els primers passos en el desenvolupament i pràctica per poder fer ús del OpenFOAM, es van visualitzar més de 80 vídeo-tutorials, fent un total de més de 60 hores de visualitzacions. Sent un total de més de 1 mes de aprenentatge previ per poder tenir els coneixements tècnics per poder abordar la complexitat d'aquest treball [26].

En els següents vincles bibliogràfics [27] [28] [29], estan la majoria de vídeos de gran utilitat per tenir un coneixement avançat en matèria de OpenFOAM.

Recursos disponibles:

	PC	Clúster FLEXICAST UPC
CPU	Intel Xeon X5650 6-core	4x AMD Opteron 6380 16-core
		2x AMD EPYC 7302 16-core
RAM	24 Gb	192 Gb
HDD	230 Gb	4 Tb

Taula 1: Característiques hardware OpenFOAM

Tot i haver-hi una considerable diferència de recursos entre el PC i el clúster, cal destacar el paper fonamental del PC, ja que l'entorn és més controlat, és un entorn directe i es pot fer un seguiment visual en pantalla de la simulació, mentre que en el clúster de la UPC, no hi ha cap interfície en pantalla mentre s'executa la simulació, a més s'ha de utilitzar un gestor de cues.

La diferència de rendiment computacional entre els dos recursos és de entre 3,7 i 5,8 vegades més ràpid el clúster respecte el PC. Tot i així, per visualitzar tots els resultats, s'ha pogut fer sense cap problema al PC. Tenint present aquestes premisses, s'ha fet ús del PC per a les proves més senzilles i d'aprenentatge, on els errors poden ser més freqüents i es busca aprendre amb rapidesa, i el clúster per a les proves més complexes i més llargues de calcular. En alguns casos, s'han realitzat les proves en ambdós casos per comprovar si hi ha diferències significatives en els resultats.

Llista de programes auxiliars utilitzats:

- **SALOME:** programa per treballar amb la geometria 3D.
- **Meshmixer:** programa per editar les malles 3D i corregir errors d'unions o micro-imperficcions.
- **SolidWorks:** programa per treballar amb l'arxiu 3D, previ a convertir-lo en una malla 3D.
- **Paraview:** programa visualitzador del OpenFOAM, per poder veure en pantalla els resultats de les simulacions, i fer el post-procés.

- **Cyberduck**: programa per connectar remotament amb el clúster FLEXICAST i poder transferir fitxers entre el PC i el clúster.
- **Notepad++**: programa per editar els fitxers “sense format” del OpenFOAM, directament, sense haver de fer-ho amb la consola de Linux, és a dir, poder editar els fitxers des de l’explorador de Windows com si d’un arxiu de text pla es tractés.

3.2. Aerodinàmica: Simulacions estacionaries

3.2.1. Esquema simulació OpenFOAM

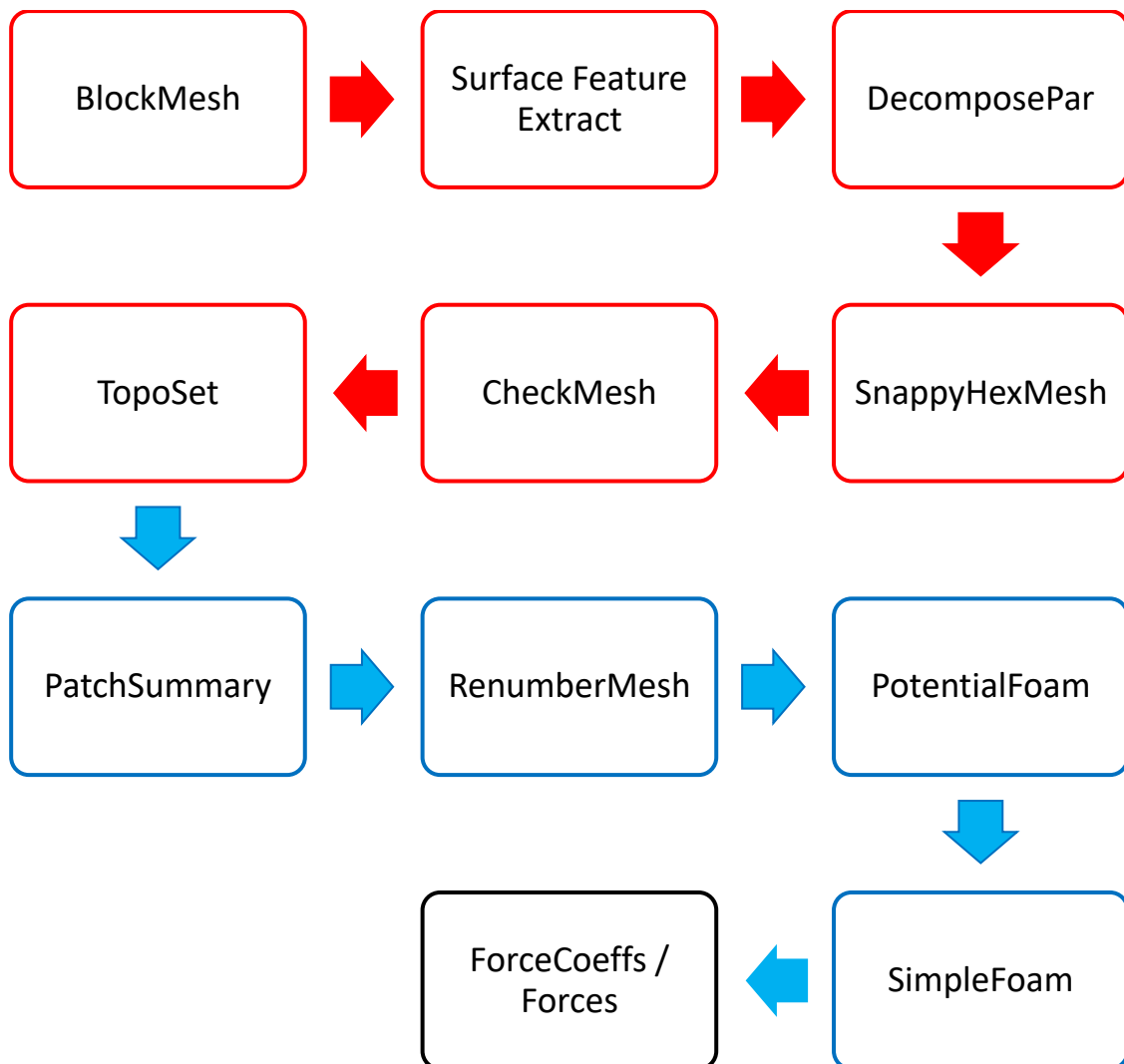


Figura.: 4: Esquema de la part estacionaria amb el OpenFOAM

Segons l'esquema anterior, la part vermella representa la part de la creació i refinament de la malla, la part en color blau representa el càlcul de la part aerodinàmica i la part en negre representa la part de post-procés. A continuació s'expliquen els blocs anteriorment exposats.

- **BlockMesh:** És una utilitat per crear malles, basades en formes hexagonals anomenades blocs, aquests blocs consten de 8 vèrtexs i 12 arestes en un ordre fixat. Aquesta malla, és coneguda com a malla de fons, es a dir, la malla que tindrà l'escenari de la simulació [30] [31].
- **SurfaceFeatureExtract:** Extreu i escriu característiques de la superfície a analitzar a un fitxer, per posteriorment, saber interpretar les superfícies del fitxer original.
- **DecomposePar:** Permet executar OpenFOAM en paral·lel amb processadors distribuïts. El mètode de computació paral·lela utilitzat per OpenFOAM es coneix com descomposició de dominis, en la qual la geometria i els camps associats es divideixen en peces i s'assignen a processadors separats per a la solució. El procés de computació paral·lela implica: descomposició de malla i camps; execució de l'aplicació en paral·lel i post-processament del cas descompost [32].
- **SnappyHexMesh:** És una eina que permet crear malles d'alta qualitat amb un patró hexagonal a partir de una geometria [30], en altres paraules, per a geometries complexes, aquesta utilitat genera una malla 3D que conté hexaedres i també triangles provinents de una geometria en format "superfície" com STL [33]. Es basa en 3 passos principals: "Castellation", "Snapping" i "Layering" [34].
- **CheckMesh:** És una utilitat que permet mostrar un informe complet de la qualitat de la malla amb els elements mètrics que hi intervenen, així com paràmetres estadístiques sobre la qualitat d'aquesta [30].
- **TopoSet:** És una petita llibreria que permet crear una selecció i un ordre específic de les cel·les per poder agilitzar i optimitzar en un executable del OpenFOAM.
- **PathSummary:** Utilitat que permet llistar els paquets de superfícies nombrats en apartats anteriors.
- **RenumberMesh:** Re-enumera la llista de cel·les per reduir l'ample de banda necessari, llegint i re-anomenant tots el camps de tots els directoris de temps. Utilitzar aquesta eina permet augmentar dramàticament la velocitat de les funcions lineals, especialment durant les primeres iteracions [19] [35].
- **PotentialFoam:** És un útil per a calcular el potencial d'un flux. És principalment utilitzat per generar un camp inicial convergent per a simulacions RANS o LES [17].

- **SimpleFoam:** És una utilitat per al càlcul d'un flux incompressible en un estat estacionari i turbulent, utilitzant l'algorisme SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Aquest útil segueix una estratègia de solució segregada. Això significa que les equacions per a cada variable que caracteritza el sistema (la velocitat, la pressió i les variables que caracteritzen la turbulència) es resolen seqüencialment i la solució de les equacions anteriors s'insereix en l'equació de N-S per a fluxos incompressibles. La no linealitat que apareix en l'equació de moment (el flux de la cara que és funció de la velocitat) es resol computant-la a partir dels valors de velocitat i pressió de la iteració anterior. La dependència de la pressió s'introdueix per evitar un desacoblament entre el moment i les equacions de pressió. La primera equació a resoldre és l'equació del moment. Proporciona un camp de velocitat que en general no és lliure de divergència, és a dir, no satisfà l'equació de continuïtat. Després d'això, el moment i les equacions de continuïtat s'utilitzen per construir una equació per a la pressió. L'objectiu és obtenir un camp de pressió que si s'insereix en l'equació de moment, proporciona un camp de velocitat lliure de divergència. Després de corregir el camp de velocitat, les equacions de turbulència es resolen. El procediment de solució iterativa anterior es repeteix fins a la convergència [36]. SimpleFoam es pot considerar que es basa en el model RANS per a simulacions incompressibles de flux turbulent. S'ha d'especificar el model de turbulència per resoldre-ho [17]. Durant la derivació en la formulació amb SIMPLE, es deixa de costat un terme. Per tant, es van derivant diferents algorismes mentre s'aproxima el terme que falta, i la formulació torna a ser consistent. Aquests algorismes es coneixen com SIMPLE i SIMPLEC (Consistent) [37].
- **ForceCoeffs/Forces:** és una llibreria que a partir de les fórmules dels coeficients adimensionals de sustentació i arrossegament mostra, en format de columna, els valors d'aquests, així com el càlcul de les seves forces que en deriven. Aquests resultats es poden exportar i visualitzar a mode de gràfic per a un correcte post-processament de les dades calculades en els blocs anteriors.

3.3. Aeroacústica: Simulacions transitòries

3.3.1. Esquema simulació OpenFOAM

La part de aeroacústica ve just a continuació de la part anterior en el esquema de funcions.

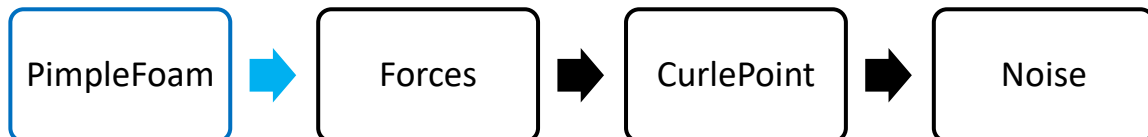


Figura.: 5: Esquema de la part transitòria de OpenFOAM

El bloc en blau representa la part de càlcul computacional i els blocs en negre representen la part de post-procés dels càlculs.

- **PimpleFoam:** L'algorisme PIMPLE és un dels més utilitzats en problemes transitoris perquè combina el PISO i el SIMPLE (o SIMPLEC). L'avantatge és que es pot utilitzar nombres de Courant més grans que 1, i per tant, el pas del temps pot augmentar dràsticament. El principi de funcionament de l'algorisme és el següent: Per a cada interval de temps, es busca una solució estacionària mentre s'aplica un factor de relaxació. Després de trobar la solució, es passa al següent interval de temps. Per fer això, s'utilitzen els anomenats bucles de correcció externa, per assegurar que totes les parts explícites de les equacions han convergit. Després d'assolir un criteri de tolerància definit per l'usuari (a la part estacionària) se surt del bucle de correcció exterior, i es passa novament al següent interval de temps. Aquest procediment es repeteix fins que s'arriba al temps de finalització de la simulació [37].
- **Forces:** el funcionament és idèntic al bloc de la part de aerodinàmica, utilitza els coeficients adimensionals d'arrossegament i sustentació per calcular les forces mitjançant la seva fórmula matemàtica.
- **CurlePoint:** Utilitza la equació de Curle (2.31) per crear un fitxer amb els valors numèrics on poder fer servir la transformada de Fourier per poder representar la pressió acústica; en aquest cas, s'utilitza com a mòdul intermedi entre el PimpleFoam i el Noise per poder treure per pantalla els espectre de pressió sonora.

- **Noise:** és una petita funció de post-procés de dades que proporciona anàlisis acústics a partir de la pressió, fent servir la transformada de Fourier i els filtres acústics desitjats.

4. METODOLOGIA DEL CAS

L'objectiu d'aquesta part del treball és descriure, primerament mitjançant figures i posteriorment de manera descriptiva, la metodologia seguida durant els canvis fets a les simulacions. Per poder seguir quins han estat les diferents versions de les simulacions fetes i quins canvis s'han aplicat per arribar a consolidar el model de simulació final que dona suport als resultats finals del següent capítol del treball.

Per consultar la informació en detall dels paràmetres del OpenFOAM que s'han anat modificant per a cada versió, quins han estat els resultats, i per què s'han pres les decisions que s'han pres, cal consultar l'**Annex B**, en el document ANNEX adjunt.

4.1. Esquemes i estructures OpenFOAM i simulacions

4.1.1. Esquema de simulacions: Part estacionària

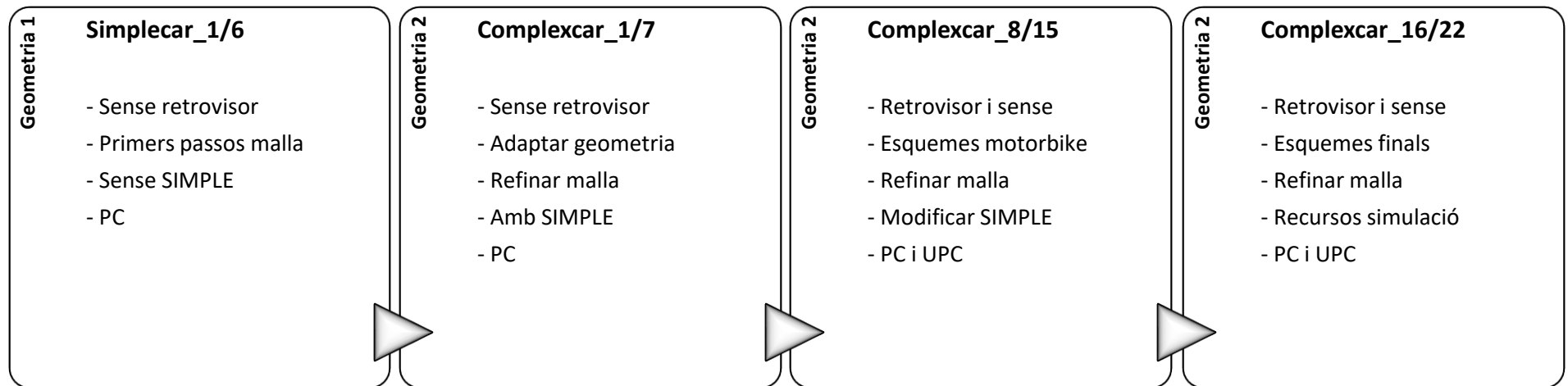


Figura.: 6: Esquema simulacions estacionaries

4.1.2. Esquema de simulacions: Part transitòria

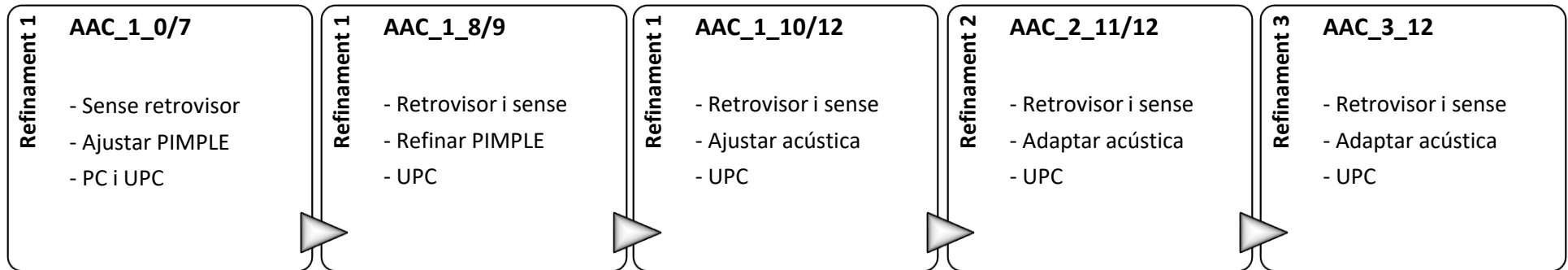


Figura.: 7: Esquema simulacions transitòries

4.1.3. Estructura OpenFOAM

Estructura prèvia a l'execució:

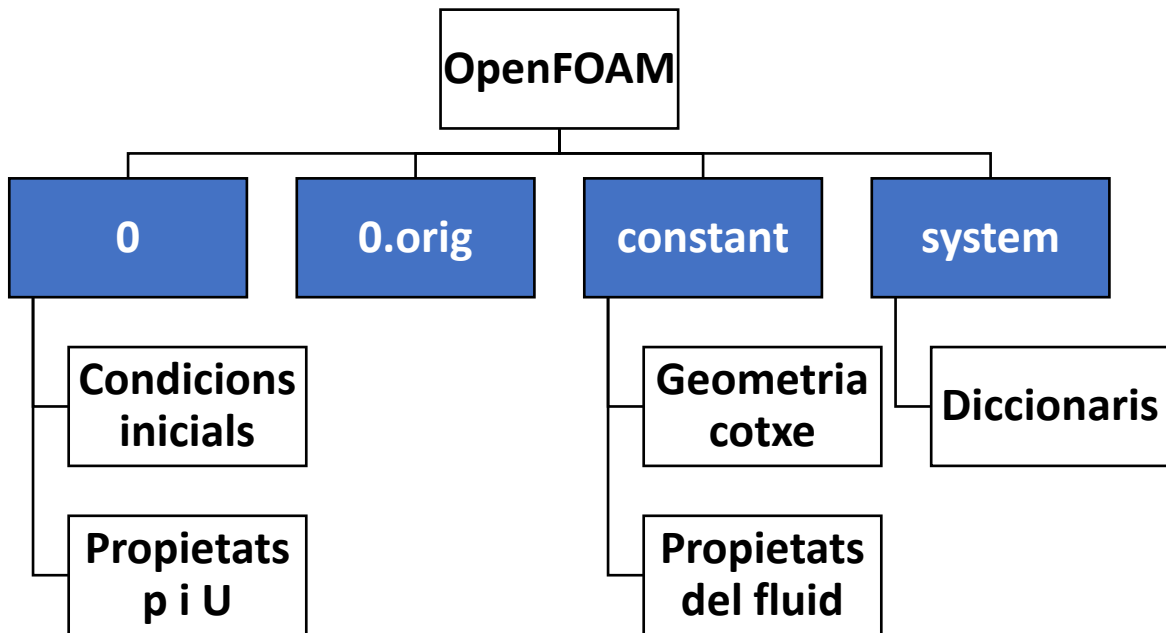


Figura.: 8: Estructura prèvia OpenFOAM

Estructura posterior a l'execució (s'afegeix a l'estructura anterior):

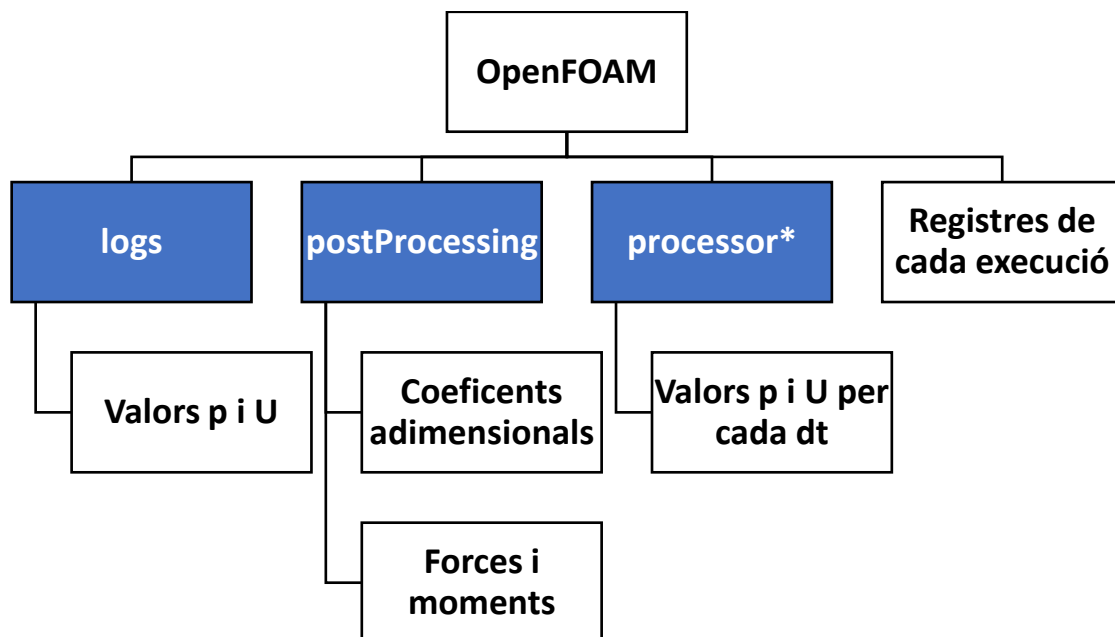


Figura.: 9: Estructura posterior OpenFOAM

4.2. Geometria

4.2.1. Retrovisor

El retrovisor es basa en una versió dissenyada prèviament per mi mateix, en SolidWorks que es basa en un retrovisor de un BMW 320td de 2004 (Fig. 12 i Fig. 13). S'ha decidit fer-ho així per aprofitar aquest recursos ja disponible i per que està basat en un model real en concret.

La geometria (Fig. 10 i Fig. 11) s'ha simplificat per evitar arestes massa complexes i petites en què la seva incidència seria mínima i la complexitat de crear la malla molt elevada.

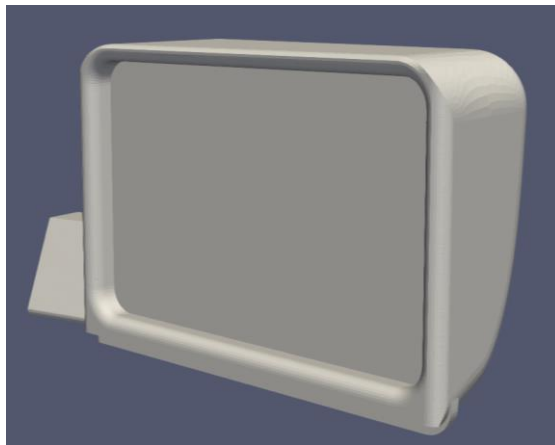


Figura.: 10: Geometria retrovisor 1

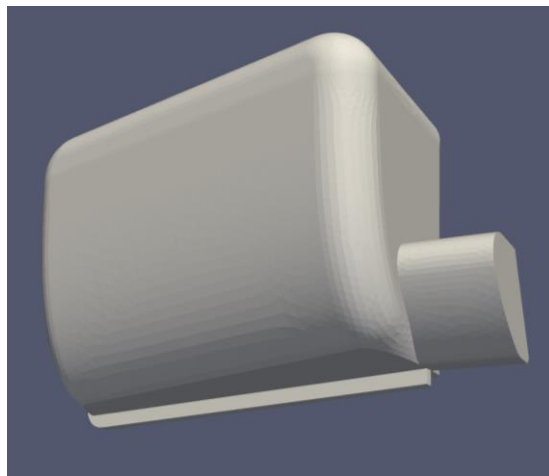


Figura.: 11: Geometria retrovisor 2



Figura.: 12: Imatge retrovisor 1



Figura.: 13: Imatge retrovisor 2

4.2.2. Geometria 1 - Simplecar

La geometria més senzilla anomenada “Simplecar” és una primera versió d’un turisme molt simplificada, aquesta geometria ja estava de un treball anterior realitzat pel mateix autor d’aquest treball. Al ser un model molt senzill permet fer les primeres proves de manera molt ràpida sent útil e les primeres fases d’aprenentatge.

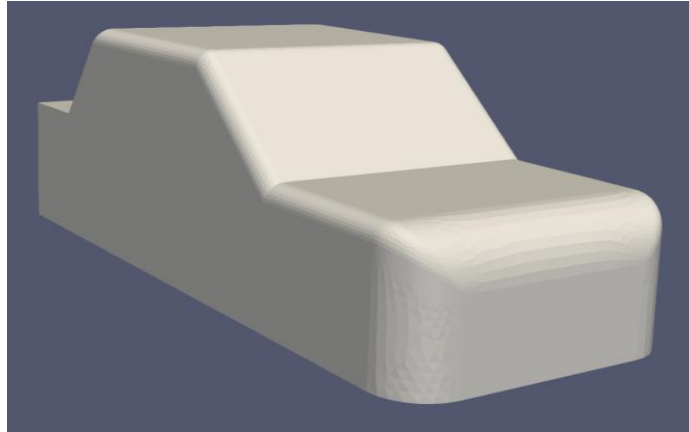


Figura.: 14: Geometria Simplecar 1

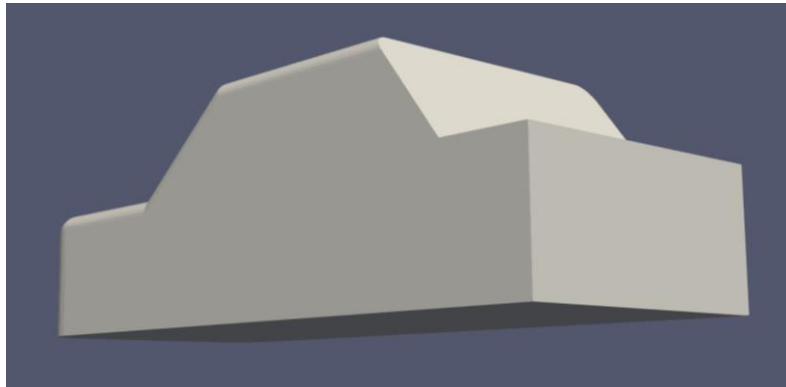


Figura.: 15: Geometria Simplecar 2

En el cas de la geometria Simplecar (Fig. 14 i Fig. 15), no es va arribar a implementar el retrovisor en detriment de la geometria 2 més favorable al desenvolupament d'aquest treball.

4.2.3. Geometria 2 - Complexcar

Aquesta geometria (Fig. 16 i Fig. 17) s'ha obtingut a través de la pàgina web [38]. Conegut localment com a "DrivAer" és una geometria modular basada en un BMW sèrie 3 e90 del 2006. Aquest model, permet seleccionar diferents mòduls del vehicle, ja sigui amb acabat berlina o "touring". A més, té l'opció de poder seleccionar que el flux passi per la calandra del turisme, entrant al motor o deixar-ho tancat, entre altres opcions. Per aquest cas, s'ha decidit fer el frontal carenat (bloquejat) per evitar tenir valors límit en àrees de la geometria que no són

d'estudi d'aquest treball, al igual que amb les rodes, s'han decidit fer carenades i tapades; la idea d'aquestes simplificacions és evitar "forats" i conductes auxiliars a través del turisme que desviïn els valors límit numèrics i l'esforç computacional de la zona del retrovisor.

Afegir que, un cop la geometria preparada, s'ha fet ús de mig vehicle, ja que al ser simètric, permet estalviar recursos de simulació, els valors finals són igualment vàlids i comparables a un turisme sencer per que s'han ajustat els paràmetres de la simulació a aquesta variació. En aquest cas sí que s'ha fet el model amb i sense retrovisor (Fig. 18 i Fig. 19).

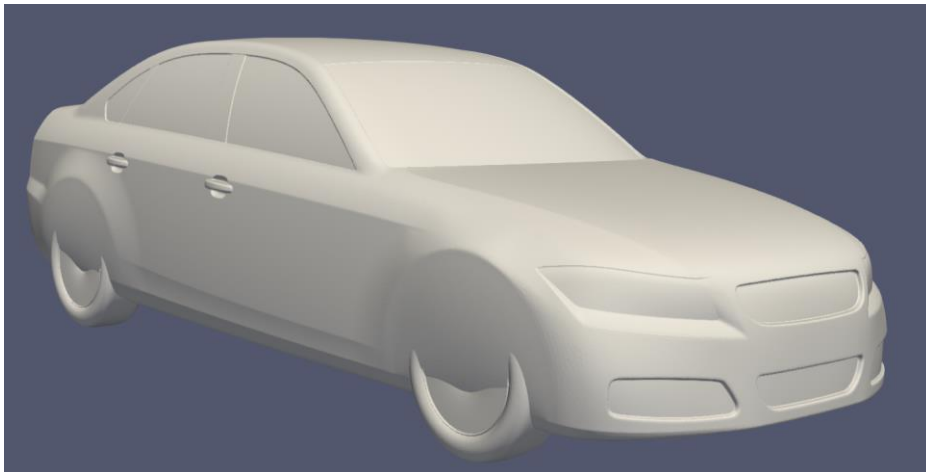


Figura.: 16: Geometria Complexcar sense retrovisor 1

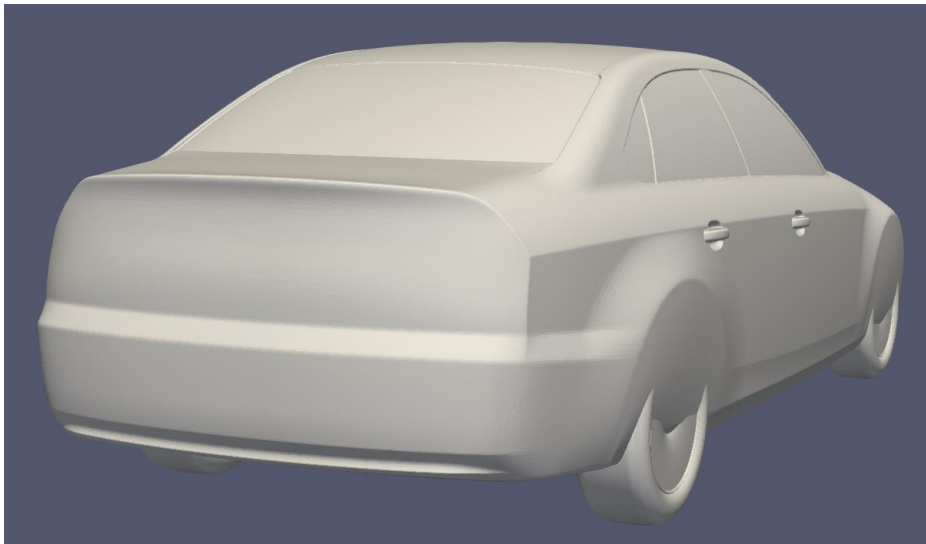


Figura.: 17: Geometria Complexcar sense retrovisor 2

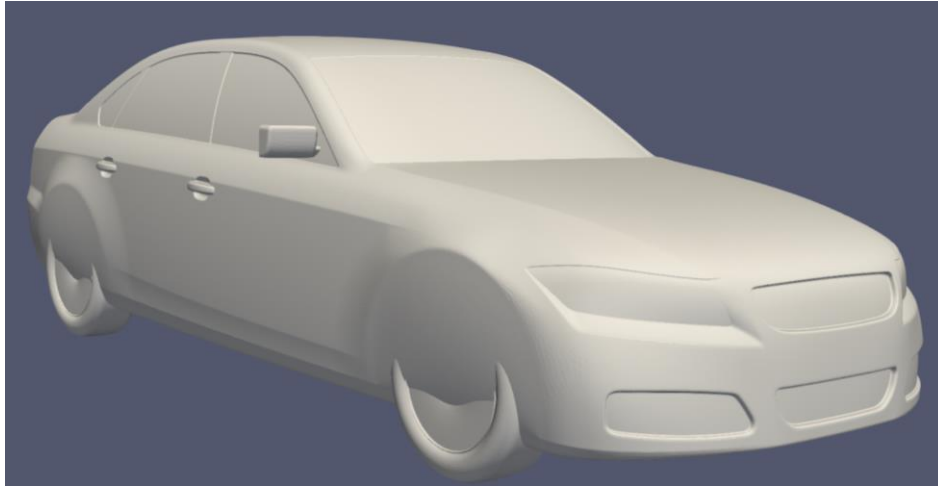


Figura.: 18: Geometria Complexcar amb retrovisor 1



Figura.: 19: Geometria Complexcar amb retrovisor 2

4.3. Mallat i flux estacionari (Aerodinàmica)

Premisses i paràmetres previs

Per aquesta part, s'han realitzat unes simulacions considerant els paràmetres estudiats en altres treballs de l'estat de l'art i documentació especialitzada i s'han anat numerant consecutivament.

En aquesta primera part, les simulacions han estat pensades per ajustar la malla a la geometria del turisme i del retrovisor, primerament, només amb paràmetres del snappyhexmesh

("Snappy") i posteriorment, quan les versions ja estaven més definides, s'ha fet ús de l'eina Simplefoam ("Simple") per calcular la aerodinàmica del vehicle i els paràmetres matemàtics que serveixen per quantificar-ho i poder analitzar si els resultats numèrics són coherents o no.

Simplecar_1/6

Simulacions basades en la geometria del Simplecar, realitzades sense retrovisor i fent ús de la estructura base del tutorial "Motorbike" en la que es calcula la aerodinàmica d'una motocicleta. Partint d'aquesta base, s'ha ajustat la malla a la geometria comentada. Fent que no s'hagi ajustat correctament.

Complexcar_1/7

S'ha readaptat de zero la malla a la nova geometria. També s'han requerit ajustaments importants degut a la composició de la geometria 2. Es decideix simular només mig cotxe a partir d'aquest moment per optimitzar les hores de treball i els recursos. Un cop s'ha ajustat de nou la malla base, es recuperen els paràmetres de l'últim cas de la geometria 1 i s'elimina la capa límit. S'utilitzen programes auxiliars per afinar els arxius originals de la geometria per poder unificar tot en un sol arxiu i corregir petites imperfeccions d'unió entre mòduls. A més, en la versió 7, es deixa preparat el model igual però amb retrovisor tot unificat i ajustat per començar a fer proves comparatives.

Complexcar_8/15

S'ha refinat la malla amb el Snappy ajustant diferents paràmetres; a partir de la versió 11, es comença a utilitzar el clúster Flexicast per poder simular amb una malla de 15 milions de cel·les, s'ha hagut d'adaptar tot el programari i codi per poder executar-se correctament amb el sistema del clúster. S'ha deixat el càlcul amb el Simple en 1000 iteracions, s'ha modificat la velocitat del fluid de 20 m/s a 27,78 m/s (equivalen a 100 km/h). Aquesta serà la velocitat consigna i no es variarà. S'ha afegit també la longitud aparent i la àrea frontal equivalent del vehicle per ajustar els valors dels coeficients i les forces a la geometria. La malla té una quantitat de cel·les superior a 15 milions però els resultats no compleixen del tot amb els valors i comportament lliard establerts.

Complexcar_16/22

Es reediten els esquemes de divergència del Simple per un model de primer grau, és a dir, és menys precís però menys restrictiu, fent que pugui convergir abans a canvi d'una divergència major en els resultats numèrics. Amb el canvi d'esquemes numèrics, s'han tornat a posar els valors de refinament de la malla per defecte com al tutorial de la moto. S'han corregit petits paràmetres matemàtics i s'ha canviat la rho del fluid de 1.00 a 1.20, que es el valor estàndard en condicions normals. Amb aquests canvis, s'ha aconseguit millorar els valors i estar dins dels valors objectiu, però es poden apreciar diferències significatives entre la versió amb i sense retrovisor. S'ha hagut de tornar als paràmetres de la versió 15, un cop fetes les anteriors adaptacions i es continua a partir d'aquí. S'ha seguit modificant varis paràmetres clau de refinament i també d'altres més secundaris, arribant a tots els nivells dels diccionaris del OpenFOAM per tat de ajustar al màxim la malla a la geometria. S'han anat ajustant per prova-error fins a donar amb la millor combinació, arribant a les 3 versions finals següents:

Versió final 1 - Complexcar_18: La malla està al voltant de 3.5 milions de cel·les i el temps de simulació és de 1.5 hores. Permet obtenir una malla molt definida i al mateix temps uns valors numèrics molt estables i dins de toleràncies consigna. Els resultats són molt favorables amb un cost computacional prou baix.

Versió final 2 - Complexcar_20.3: en aquesta versió de la simulació, es determinen una sèrie de paràmetres clau respecte anteriors versions: s'aconsegueix tornar a aplicar la capa límit amb una eficàcia del 94% respecte tota la superfície de la geometria i el compromís entre els resultats numèrics, recursos de càlcul i resultats visuals, és el més equilibrat; per contra, el número de cel·les passa de 3.5 milions a 11; i tarda en simular unes 4 hores i 20 minuts aproximadament. A partir d'aquest punt, les proves restants, es compararan amb aquesta versió.

Versió final 3 - Complexcar_22: es considera que és el últim cas final, s'han ajustat alguns paràmetres molt concrets que han permès corregir petites tendències dels residus matemàtics i també amb la malla. Ha permès establir el valor final de iteracions a 600 per a la part de aerodinàmica, estalviant temps de càlcul i simulació. El nombre de cel·les és de 12.6 milions i el temps de simulació és de 3 hores aproximadament.

4.4. Flux transitori (Aeroacústica)

Premisses i paràmetres previs

Es considera que el **AAC_1** ve del **Complexcar_18**, el **AAC_2** ve del cas **Complexcar_20.3** i el **AAC_3** ve del cas **Complexcar_22**.

Per fer l'estudi del flux en transitori i poder estudiar l'acústica d'aquest, s'ha de implementar l'eina PimpleFoam ("Pimple"), explicat en més detall en el punt 3.3.1.

S'ha utilitzat el tutorial del OpenFOAM anomenat "VortexShed" com a base per a aquesta part, ja que utilitza una geometria molt senzilla però fa ús del càlcul del PimpleFoam i de Curle. Aquesta part s'executa just a continuació de la part estacionària i requereix dels càlculs d'aquesta primera part per poder executar el mòdul transitori. S'han utilitzat uns paràmetres numèrics consigna equivalents als de la part estacionària i s'ha fet un seguiment del nombre de Courant per poder tenir un criteri quantitatiu.

S'ha hagut de definir un interval de temps concret d'execució de la simulació, i un temps total d'execució. L'interval de temps ve fixat pel teorema de Nyquist, esmentat en el punt 2.3.4. Per poder tenir un espectre acústic prou ample s'ha considerat fer de 10 Hz a 2000 Hz, ja que inclou els sorolls més representatius quotidians segons [39] [40] [41] i permet així, tenir un interval de temps de 0.25 mil·lèsimes de segon entre iteració i iteració. Com a temps de simulació màxim s'ha plantejat fer al voltant de 0.5 segons de simulació. Es torna a fer ús del PC i del clúster simultàniament, on les primeres proves són al PC per facilitar de programar i control i, finalment al clúster les proves més complexes.

Cal destacar la importantíssima informació consultada per entendre els paràmetres i el funcionament de la part de flux transitori, gràcies a les següents referències bibliogràfiques [19] [37] [42] [43].

AAC_1_0/7

S'han utilitzat els paràmetres base del tutorial ajustats per la geometria i el interval de temps d'aquest cas. No s'han obtingut els resultats desitjats i la simulació empitjorava a cada canvi, degut a això, s'han aplicat uns nous paràmetres, segons [19], més estandarditzats en la indústria. Amb aquests canvis s'han pogut corregir part dels primers errors de simulació i els valors han

millorat, tot i així, s'ha decidit canviar els esquemes de càlcul, tant els de divergència com els de convergència, i també els del PimpleFoam, amb això s'han millorat molt els resultats numèrics. S'ha canviat el model numèric de SIMPLE a SIMPLEC (és una evolució de l'anterior pot resultar millor en entorns de simulació concrets) i s'han adaptat els factors de relaxació. Per consultar la informació detallada a nivell matemàtic del SIMPLEC respecte el SIMPLE, a la bibliografia [19] [37] [44].

AAC_1_8/9

S'han deixat els paràmetres bastant ajustats i s'ha acabat implementant el model SIMPLEC de manera definitiva. El model SIMPLEC pot convergir fins a un 20% més ràpid si els factors de relaxació són adequats (normalment més alts que en el cas SIMPLE) i els resultats són lleugerament millors. Mentrestant, s'ha decidit per un esquema de segon ordre Crank-Nicolson, ja que divergeix menys, és més precís, però és més oscil·latori. En aquest punt però, els paràmetres estan prou ben ajustats com per tenir uns resultats numèrics dins de valors consigna i gairebé iguals que per un esquema de primer ordre com Euler.

AAC_1_10/12

S'han acabat d'ajustar els últims paràmetres menors i alguns termes en l'arxiu d'execució, s'ha aplicat a partir d'aquí el càlcul de Curle, després s'ha fet la transformada de Fourier amb el l'eina Noise per poder obtenir la freqüència i els decibels per a cada punt definit en l'espai 3D. En un primer model, s'ha establert una malla de 4x4x2 micròfons en disposició vertical, amb aquests primers 32 punts de mesura s'ha valorat quins d'ells ofereixen una informació més rellevant i quins d'ells tenien lectures iguals pel fet d'estar massa a prop. En el cas de la funció Noise, té un paràmetre que permet definir la definició de l'espectre en funció de la quantitat de iteracions temporals calculades, per això, s'han fet primerament unes simulacions ràpides amb poca definició per poder tenir una lectura ràpida de valors i després s'ha passat a fer simulacions de 0.3 segons de duració, on la definició és de 1024 punts, respecte els 256 de les proves ràpides.

Un cop fetes les simulacions prèvies, s'ha decidit eliminar els punts semblants i deixar 8 punts finals en una graella espacial vertical de 3x3x2.

Degut a una petita irregularitat en l'espectre de pressió sonora, s'ha decidit disminuir a la meitat el interval de temps (0.125 mil·lèsimes de segon) per poder arribar a visualitzar fins a 4000 Hz. I

això s'ha fet amb dos nivells de definició, les proves curtes amb 512 punts i les llargues (les finals) amb 4096 punts i un temps de simulació de 0.52 segons, on el temps de simulació per aquest cas final ha estat de més de 15 hores.

AAC_2_11/12

S'ha agafat de punt de partida la versió 11 del model de refinament 1 i s'ha intentat adaptar al cas 2 on els paràmetres de refinament de la malla són diferents i més complexes.

Primerament amb un interval de temps de 0.25 mil·lèsimes de segon i posteriorment per la meitat d'aquest temps, tal i com en els casos anteriors. S'ha decidit donar per vàlida l'adaptació en aquest segon nivell de refinament, millorant en alguns aspectes concrets els resultats de l'anterior cas final.

La simulació de la part de flux transitori ha tardat en executar-se al voltant de 42 hores.

AAC_3_12

Aquest ha estat l'última versió amb l'últim cas de refinament, s'ha adaptat directament sobre la versió **2_12** i al no haver gaires canvis a nivell de paràmetres de refinament, l'adaptació s'ha pogut fer amb èxit sense haver de modificar res significatiu, amb la qual cosa, s'han donat per vàlids els resultats mostrats per aquesta última versió, sent la més completa i la més refinada.

La simulació de la part de flux transitori ha tardat en executar-se al voltant de 35 hores.

Un cop explicada la metodologia del desenvolupament d'aquest treball, es pot consultar amb més detall al **Annex C** del document adjunt ANNEX, els paràmetres dels arxius principals seleccionats pel model definitiu **AAC_3_12** del OpenFOAM.

5. RESULTATS NUMÈRICS

Aquest capítol del treball, se centra en mostrar els resultats obtinguts de la part numèrica, principalment provinents de la pressió i la velocitat, així com els càlculs de post-procés que deriven d'aquests. Tenint sempre dos escenaris de comparació durant tota la representació de resultats: el model amb retrovisor i el model sense retrovisor, tant a nivell visual com a nivell numèric. Cal destacar que en aquesta part, només és mostren un recull dels principals resultats més rellevants, per fer més fàcil la comprensió del text i la extensió del treball.

Per a una interpretació més detallada de la malla de l'escenari de simulació, i poder tenir una idea més gràfica de com està refinada, es pot consultar al **ANNEX D.1**.

5.1. Resultats part estacionària – Aerodinàmica

En aquesta primera part, es mostren els resultats de l'estudi aerodinàmic del model final Complexcar_22, donant rellevància als següents factors:

Els residus matemàtics: es tracta dels valors numèrics residuals de les assumpcions que s'han de fer des d'un punt de vista teòric, per resoldre i afrontar els problemes de la mecànica de fluids. Aquests valors residuals ajuden a decidir qualitativament quin valor és prou petit com per ser considerat matemàticament acceptable. S'ha considerat com a valor consigna a obtenir i, per tant, ser matemàticament acceptable, valors residuals per sota de 10^{-3} . Aquesta part, tot i ser rellevant, pertany a un anàlisi intermedi de resultats per arribar als veraders resultats que tenen a veure directament amb la part aerodinàmica, per tant, es poden consultar en detall al **ANNEX D.2**.

Forces i coeficients adimensionals aerodinàmics: Són les forces i els coeficients adimensionals que fan referència al comportament aerodinàmic que té el sòlid amb el fluid i que determina si està dins de uns valors tipus o no. S'ha considerat uns valors tipus assumits per la indústria i d'altres línies d'investigació com es mostren en aquest estudi [45]. A la part de aeroacústica es representen les forces i no pas els coeficients, amb la qual cosa, es important tenir uns valors de referència finals de la part de aerodinàmica que serveixin de resultats consigna per comparar amb la part transitòria de la simulació.

Simulació final – Complexcar_22

En aquesta part es poden observar els dos gràfics principals referents a la part de aerodinàmica, el primer, referent a la Fig. 20, com es pot observar les dues forces d'interès, referents al fluid que va en direcció frontal al vehicle i el fluid que va en direcció vertical al vehicle. No s'ha tingut en compte la força en direcció transversal al vehicle per que la simulació s'ha fet amb només mig vehicle i, tant les forces com els moments, haurien de ser propers a zero en el cas del vehicle sencer simulat però per a aquest cas no ha estat així, amb la qual cosa, no és rellevant ni es pot tenir en consideració a l'hora de avaluar els valors finals. En els gràfics es pot observar com el cas amb retrovisor està indicat amb una "R".

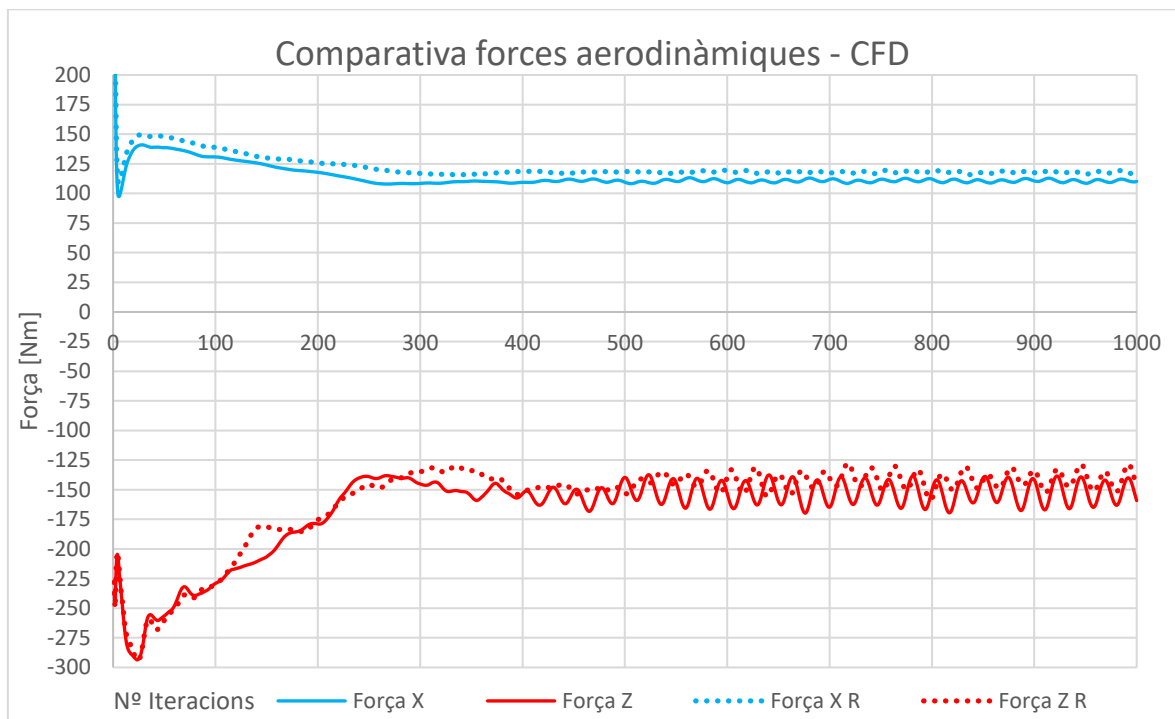


Figura.: 20: Comparativa forces aerodinàmiques - CFD

Les forces en X són lleugerament més altes en el cas amb retrovisor, degut principalment a la superfície frontal que fa de obstacle per al flux en aquesta direcció; així com en cas de la força en direcció Z (vertical) també, tot i que és més subtil degut a que la direcció principal del flux és en X. Al ser una "protuberància" que sobresurt del cotxe, indirectament també ofereix més resistència al pas del fluid en direcció vertical.

En aquest segon gràfic, referent a la Fig. 21, es pot observar com es representen els coeficients adimensionals derivats de les forces abans vistes a la Fig. 20; tal i com es pot veure, el coeficient d'arrossegament (C_d) referent a la força X, és més elevat en el cas amb retrovisor, situant-lo en valors al voltant de 0.26, mentre que en el cas sense, està al voltant de 0.24. Aquests valors són molt destacables al món de l'automoció on hi ha una pressió molt gran en reduir el coeficient per reduir el consum de bateria o combustible. Pel cas del coeficient de sustentació o C_l , s'ha optat per invertir-lo i posar-lo negatiu degut a que també és conegut com a "downforce", que és la força que fa l'aire per mantenir el cotxe adherit al paviment. En aquest cas, com més gran millor. Es pot observar com en aquest cas, s'inverteix la tendència, degut segurament a que el retrovisor no és un element dissenyat amb gaire forma de fus, amb la qual cosa, no és aerodinàmicament eficient, i per tant, fa que el cotxe tingui lleugerament menys "downforce".

Els resultats són oscil·latoris degut als models de segon ordre utilitzats.

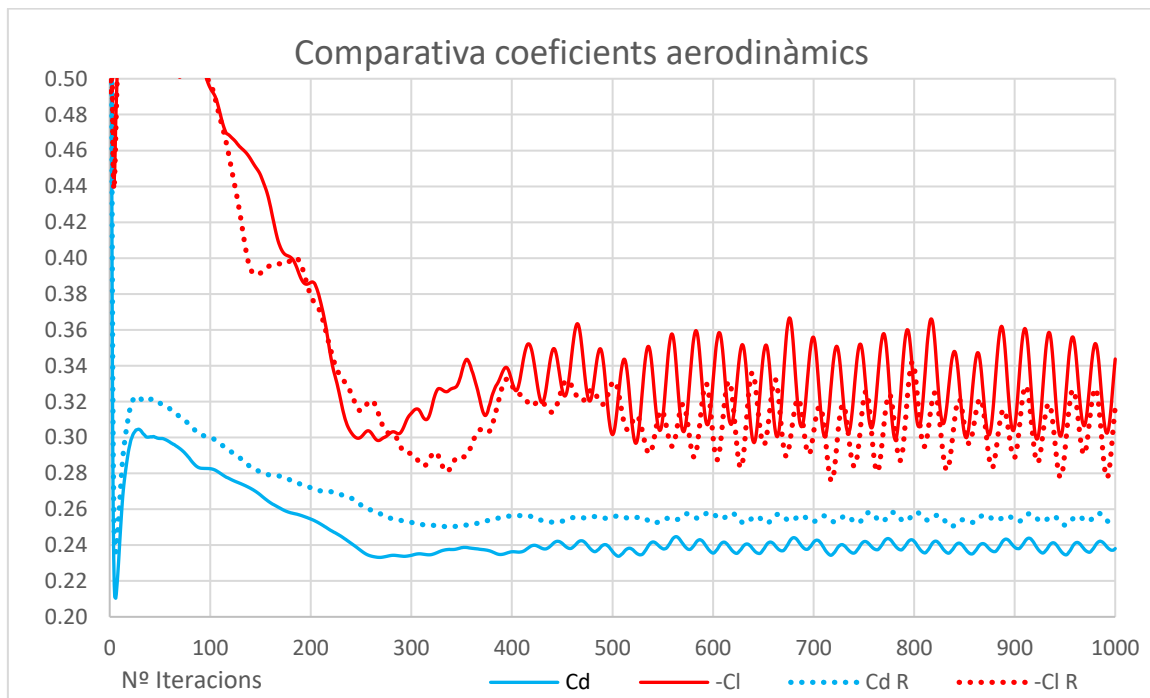


Figura.: 21: Comparativa coeficients aerodinàmics

En les següents figures es pot observar la representació de la velocitat en l'eix X (Fig. 22 i Fig. 23) i a l'eix Z (Fig. 24 i Fig. 25), complementant de manera visual els gràfics de les forces aerodinàmiques vists. És rellevant per poder tenir una aproximació visual del nivell de definició del cas i de la implicació numèrica que té en la superfície del vehicle a les diferents parts, així com de la zona d'interès al voltant del retrovisor tal com a les Fig.26 i Fig. 27 per a les forces en X i a les Fig. 28 i Fig. 29 per a les forces en Z.

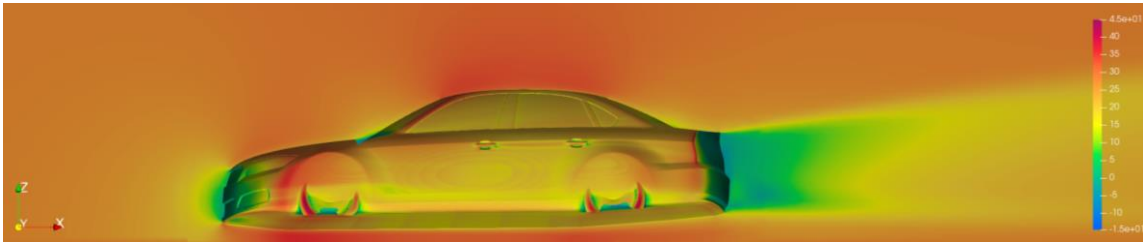


Figura.: 22: Representació del pla de la Velocitat [m/s] en X sense retrovisor

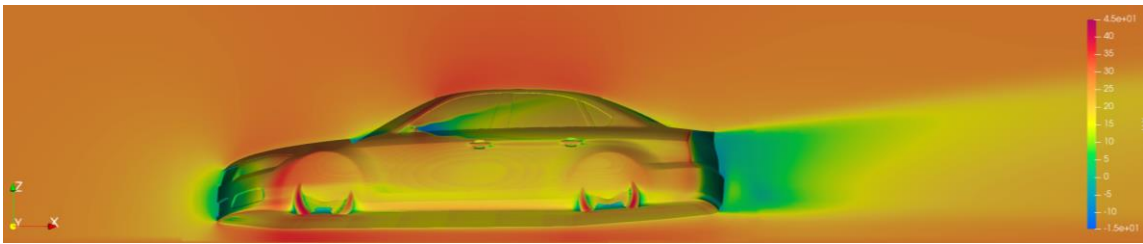


Figura.: 23: Representació del pla de la Velocitat [m/s] en X amb retrovisor

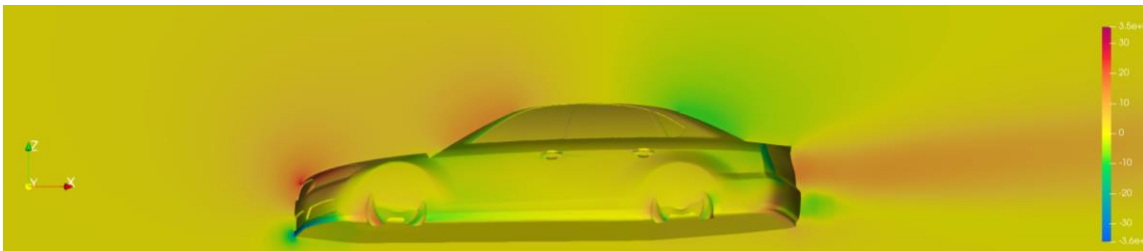


Figura.: 24: Representació del pla de la Velocitat [m/s] en Z sense retrovisor

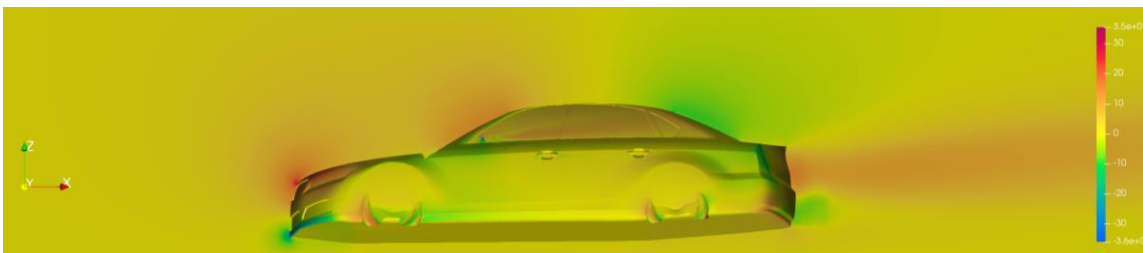


Figura.: 25: Representació del pla de la Velocitat [m/s] en Z amb retrovisor

Tal i com es pot observar, a les figures d'aquesta mateixa pàgina, es pot veure com l'estela de la velocitat al voltant del vehicle és bastant semblant, tant per el component X com Z, sent apreciable al llarg de la finestra lateral de conductor, on es veu una clara influència a llarg de la

superfície, arribant inclús l'estela a la finestra de la part posterior lateral. Això ja és un indicador de l'efecte turbulent que genera el retrovisor vers el cas que no n'hi ha.

A continuació es mostren unes figures representant un punt de vista més proper del vehicle per poder observar millor l'efecte sobre la superfície del vehicle.

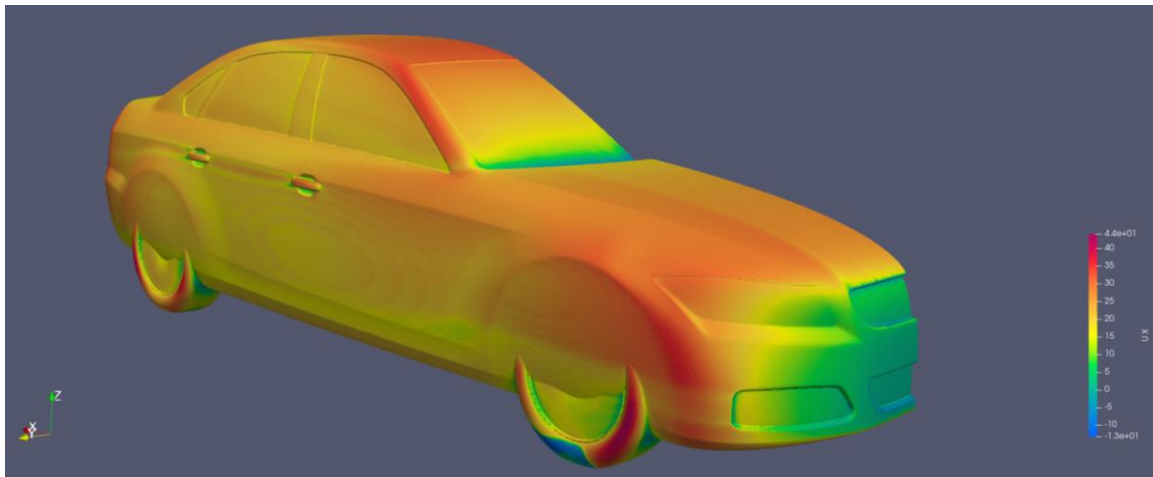


Figura.: 26: Representació de la Velocitat [m/s] en X sense retrovisor

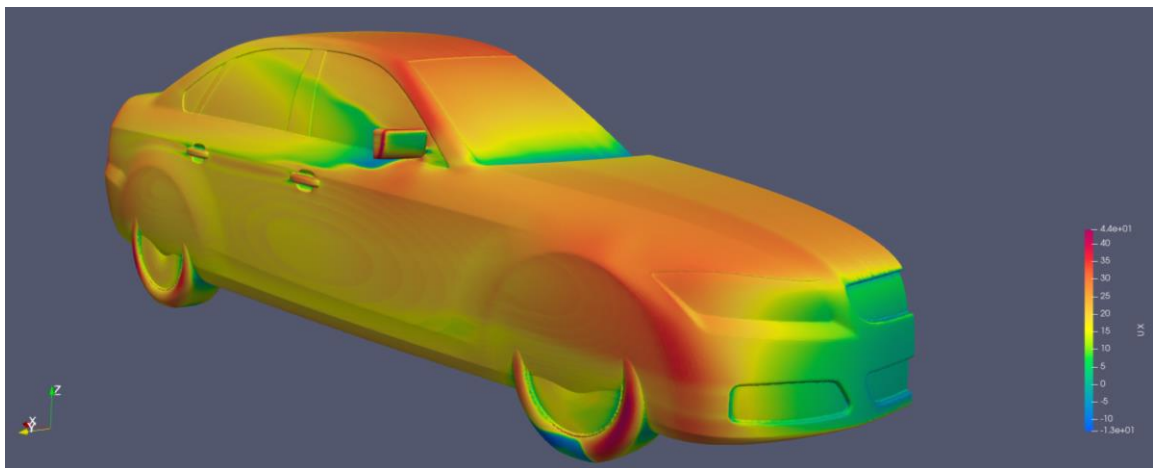


Figura.: 27: Representació de la Velocitat [m/s] en X amb retrovisor

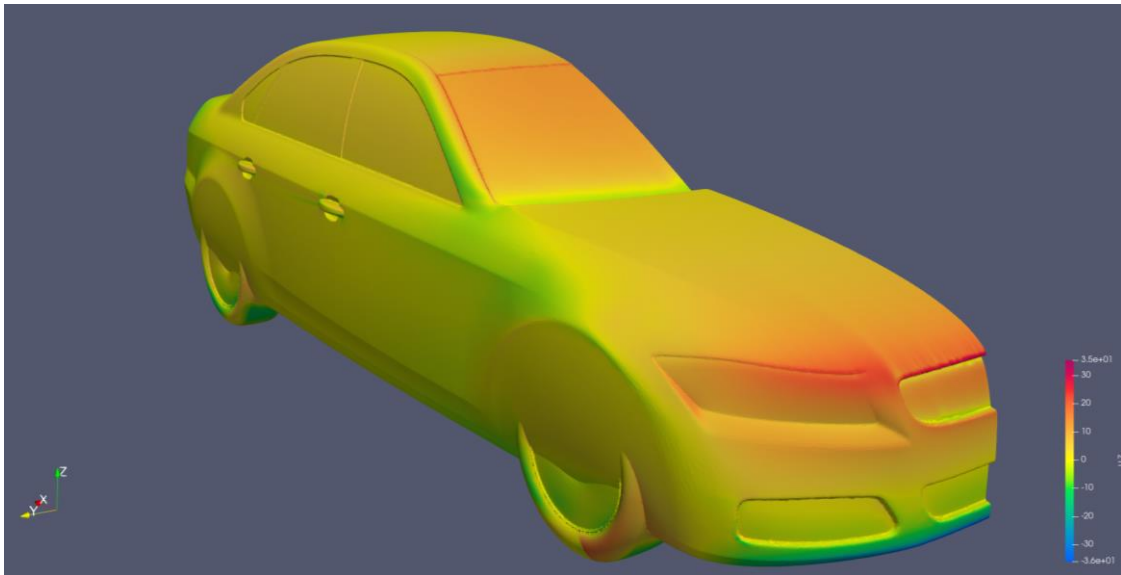


Figura.: 28: Representació de la Velocitat [m/s] en Z sense retrovisor

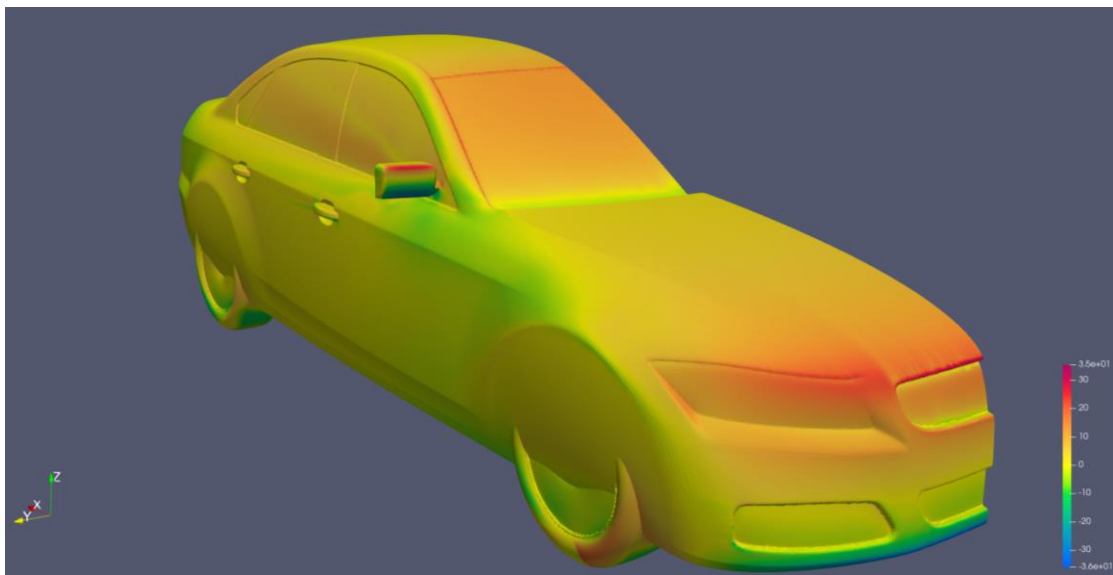


Figura.: 29: Representació de la Velocitat [m/s] en Z amb retrovisor

Per a les figures 26, 27, 28 i 29, es pot veure amb més atenció la superfície del vehicle i com, en quasi tota ella, els valors són equivalents entre ambdós casos, exceptuant a la zona del voltant del retrovisor. Es genera una clara estela de velocitats inferiors i superiors al voltant, així com contra el propi retrovisor, fent així que també se'n vegi afectada la zona del pilar A del vehicle i la part més inferior de les portes per sota del vidre. Es confirma el que s'intuïa a les figures 23 i 25.

A les següents figures, es vol representar un instant de la simulació on es representen les línies de flux de la velocitat en X (al ser la velocitat del fluid imposada, és la més rellevant i interessant). Es representa primerament a les figures 30 i 31, una línia de flux paral·lela a la finestra lateral, sent rellevant que surti representat el pilar A del vehicle per veure com afecta també.

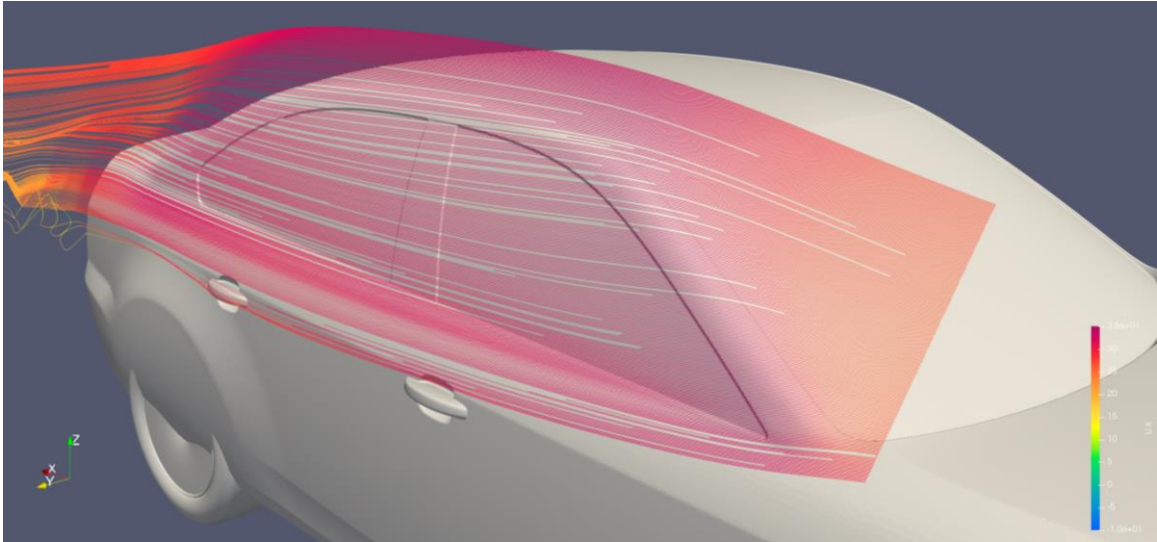


Figura.: 30: Detall 1 de la Velocitat [m/s] en X sense retrovisor

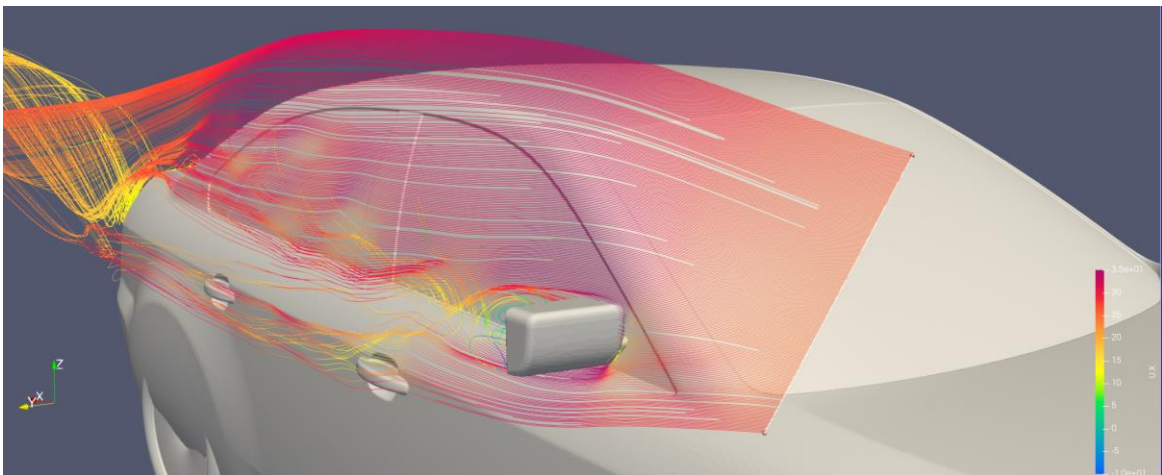


Figura.: 31: Detall 1 de la Velocitat [m/s] en X amb retrovisor

Tal i com es pot comprovar, es veu clarament la pertorbació que genera al tenir el retrovisor instal·lat, els vòrtexs que genera tenen velocitats fluctuants en l'esquema de colors, que recorren tot el lateral del vehicle, deixant una estela al final de vehicle amb molta més turbulència en comparació amb la figura 30 que l'estela és molt més constant en tot el recorregut de la superfície del vehicle.

Per a les figures 32 i 33, es mostren dos fluxos creuats a la zona del retrovisor, per buscar el detall referent a les figures anteriors 30 i 31; en aquest cas, es pot veure amb més claredat com impacta contra el retrovisor i genera una turbulència força gran que arriba fins a la part posterior del vehicle, ajuntant-se amb la pròpia turbulència del vehicle.

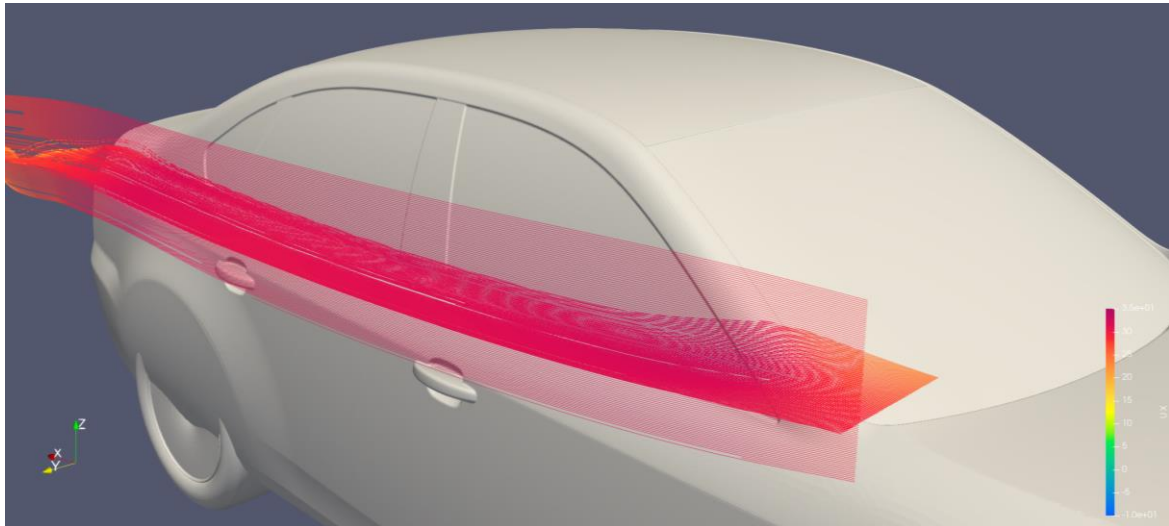


Figura.: 32: Detall 2 de la Velocitat [m/s] en X sense retrovisor

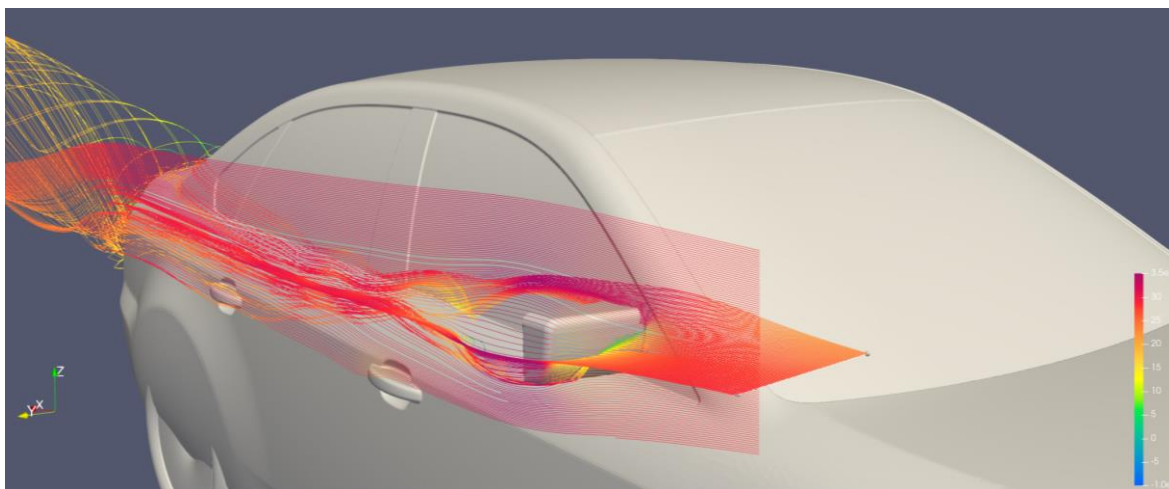


Figura.: 33: Detall 2 de la Velocitat [m/s] en X amb retrovisor

5.2. Resultats part transitòria – Aeroacústica

En aquesta segona part, es mostren els resultats de l'estudi aeroacústic del model final AAC_3_12, fent important rellevància en el comportament de:

Els residus matemàtics: es tracta dels valors numèrics residuals de les assumpcions que s'han de fer des d'un punt de vista teòric, per resoldre i afrontar els problemes de la mecànica de fluids. Aquests valors residuals ajuden a decidir qualitativament quin valor és prou petit com per ser considerat matemàticament acceptable. S'ha considerat com a valor consigna a obtenir i, per tant, ser matemàticament acceptable, valors residuals per sota de 10^{-3} . Aquesta part, tot i ser rellevant, pertany a un anàlisi intermedi de resultats per arribar als veraders resultats que tenen a veure directament amb la part aerodinàmica, per tant, es poden consultar en detall al **ANNEX D.3**.

Forces aerodinàmiques: es tracta dels valors de forces que fan referència al comportament aerodinàmic que té el sòlid amb el fluid i que determina si està dins d'uns valors tipus o no. Aquestes forces venen directament calculades dels coeficients adimensionals aerodinàmics i per fer-ho, es tenen en compte les mesures físiques del sòlid. Té rellevància per poder tenir una comparativa amb el càlcul de les forces en el estat estacionari i poder així, mirar si amb el càlcul en transitori, disten molt i/o tenen un comportament semblant.

Nombre de Courant: és el valor que permet identificar si els càlculs de cada iteració i per a cada volum de control es poden resoldre per a cada interval de temps preestablert. Tot i així, el PIMPLE permet tenir valors superiors a 1, sempre és recomanable estar per sota de 4 i a ser possible per sota de 1 com a ideal. Els valors màxims es poden donar per a cel·les molt puntuals i especialment complexes en alguns casos, en aquest cas, es buscarà el valor més baix possible intentant buscar uns valors estables.

SPL (espectre de pressió sonora): és l'espectre generat a partir de la pressió acústica amb l'analogia de Curle que, mitjançant la transformada de Fourier de la funció Noise del OpenFOAM, permet tenir un espectre amb la intensitat del so i la freqüència. És l'objectiu a perseguir per poder comentar i discutir un dels principals objectius d'aquest treball. A raó d'aquests valors numèrics, així com discutir quin és el seu comportament.

Simulació final – AAC_3_12

A la Fig. 34, es poden observar les forces referents a l'eix X, que es la direcció del fluid i a direcció Z que és la vertical. En aquest segon escenari transitori es pretén buscar una correlació amb les forces pel cas estacionari i comprovar quin és el comportament i si són del mateix ordre de magnitud per poder verificar que són coherents i els dos escenaris, guarden una coherència matemàtica i així, poder donar validesa al model computacional.

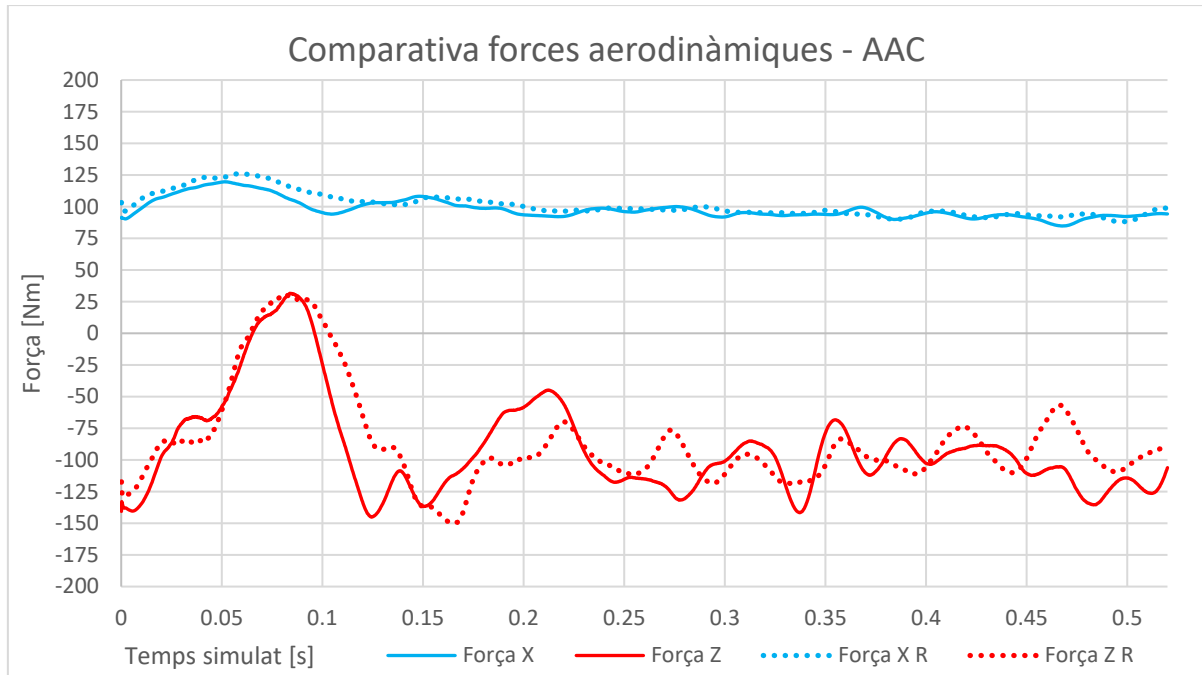


Figura.: 34: Comparativa forces aerodinàmiques - AAC

En aquest cas, es pot comprovar com els valors de les forces en direcció X són pràcticament idèntics que en el cas estacionari i entre el model amb i sense retrovisor, donen quasi igual, tenint un comportament matemàtic més igual que no pas en el cas anterior amb la Fig. 20. Pel cas de la força vertical (en eix Z), té un comportament molt més oscil·latori però tot i així són valors equivalents amb el cas estacionari, i entre el model amb i sense retrovisor tenen uns valors quasi iguals. Fet que demostra la paritat entre models i la robustesa del model matemàtic.

En les següents figures (Fig. 35 i Fig. 36) es pot observar el número de Courant (que és adimensional), que tal i com s'ha comentat anteriorment, és un valor que permet identificar si els càlculs s'estan fent a temps per a cada iteració de temps de simulació. En aquest cas, es busca que el Courant mig sigui inferior a 1 en ambdós casos (amb i sense retrovisor).

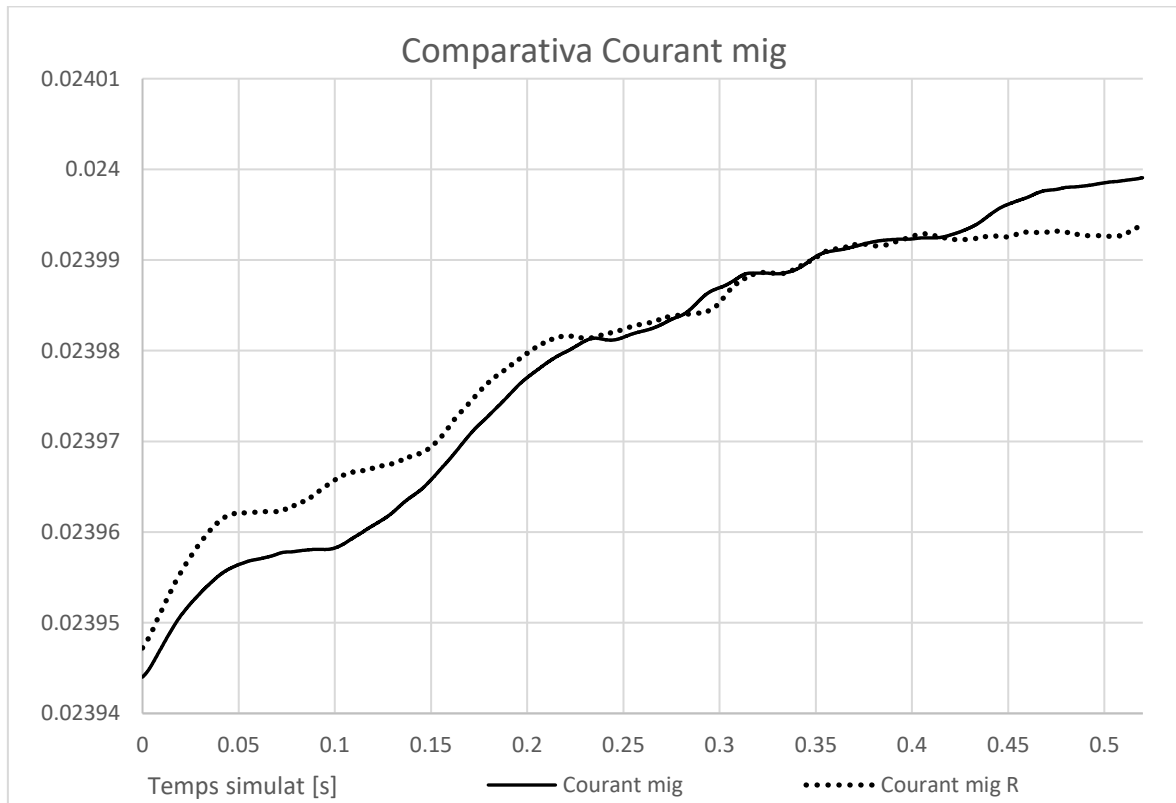


Figura.: 35: Comparativa Courant mig

Per aquest cas, es pot comprovar com els valors són quasi idèntics i estan al voltant de 0.024, un valor clarament inferior que garanteix una bona robustesa matemàtica. Tot i tenir un tendència creixent, l'escala de valors és tant petita que es podria dir que té una tendència constant.

Pel següent cas (Fig. 36), es busca establir el mateix anàlisi amb el Courant màxim, en aquest cas, segons les fonts bibliogràfiques buscades, és recomanat estar per sota de 4 com a valor màxim.

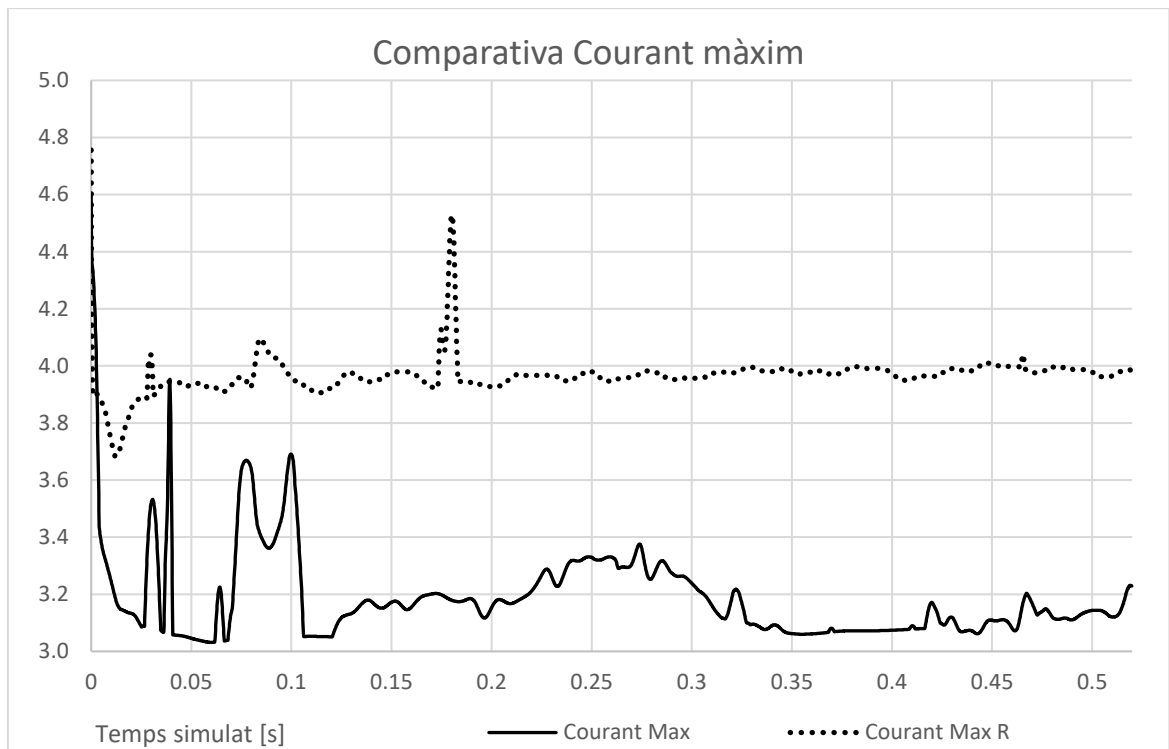


Figura.: 36: Comparativa Courant màxim

Tal i com es pot observar, els valors estan al voltant de 3 per al cas sense retrovisor i al voltant de 4 pel cas amb retrovisor, es pot establir que són uns valors dins de toleràncies acceptables; probablement el valor més elevat pel cas amb retrovisor sigui per la geometria més complexa d'aquest en comparació amb les arestes més "fàcils" del cas sense retrovisor, aquest fet fa augmentar puntualment el valor d'alguna cel·la més complexa.

Per a les següents figures, es busca mostrar una representació visual de la pressió, equivalentment que en el cas de aerodinàmica previ (apartat 5.1), en aquesta ocasió és més destacat mostrar la pressió, ja que és l'avantsala de la creació dels gràfics SPL que es veuran al final d'aquest mateix apartat.

Concretament, pel cas de les figures 37 i 38, es pot veure com l'espectre visual és quasi idèntic en tot l'escenari de simulació i només al voltant del retrovisor és on s'aprecien més diferències de Pressió.

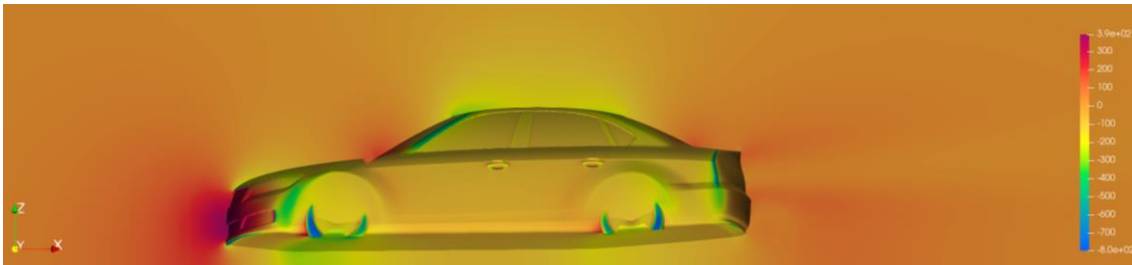


Figura.: 37: Representació del pla de la Pressió [Pa] sense retrovisor

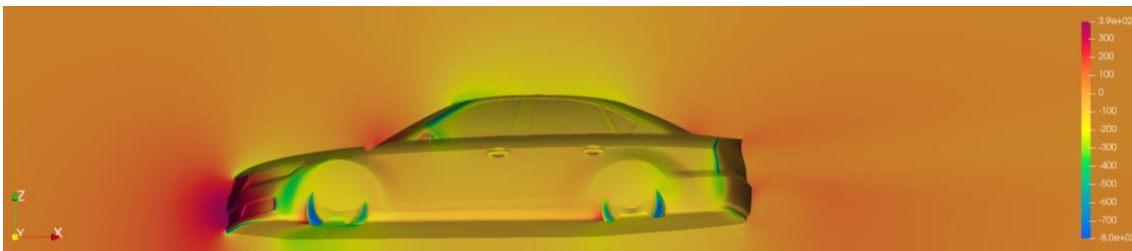


Figura.: 38: Representació del pla de la Pressió [Pa] amb retrovisor

Aquestes figures (37 i 38) busquen també demostrar, en part, la independència de la malla dels resultats, fent que només siguin apreciables diferències de valors al voltant de la zona d'interès.

Per al cas següent, referent a les figures 39 i 40, es vol mostrar un punt d'observació més en detall de la superfície del vehicle, amb una imatge més detallada de la zona del retrovisor, així com tota la superfície lateral del vehicle. Cal destacar que entre el model amb i sense retrovisor es mostra una homogeneïtat al llarg de la resta de la superfície exceptuant la zona d'interès, fet de gran interès per comprovar la desvinculació entre els resultats dels dos escenaris a nivell de qualitat de malla.

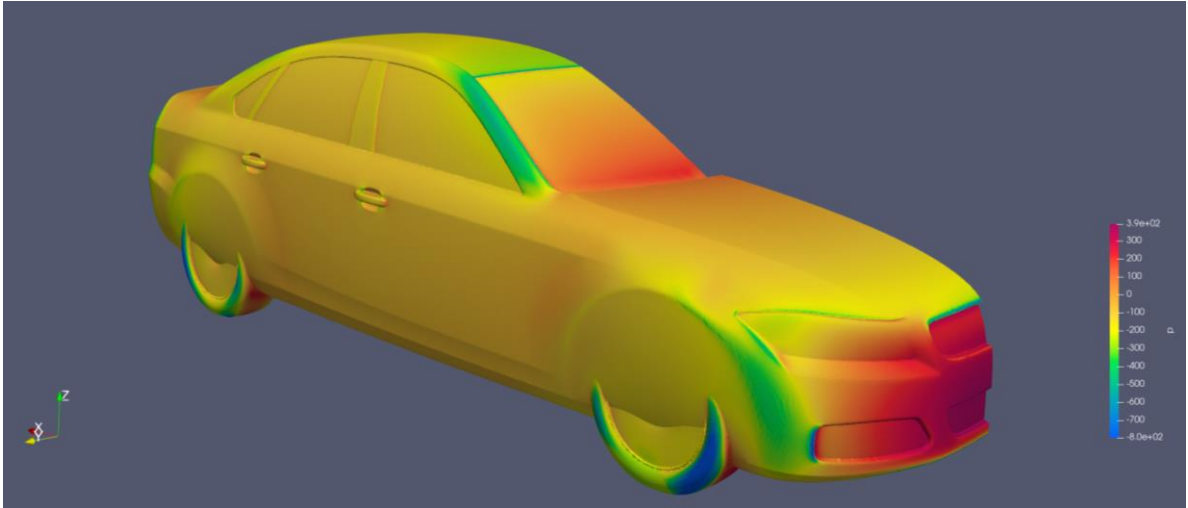


Figura.: 39: Representació de la Pressió [Pa] sense retrovisor

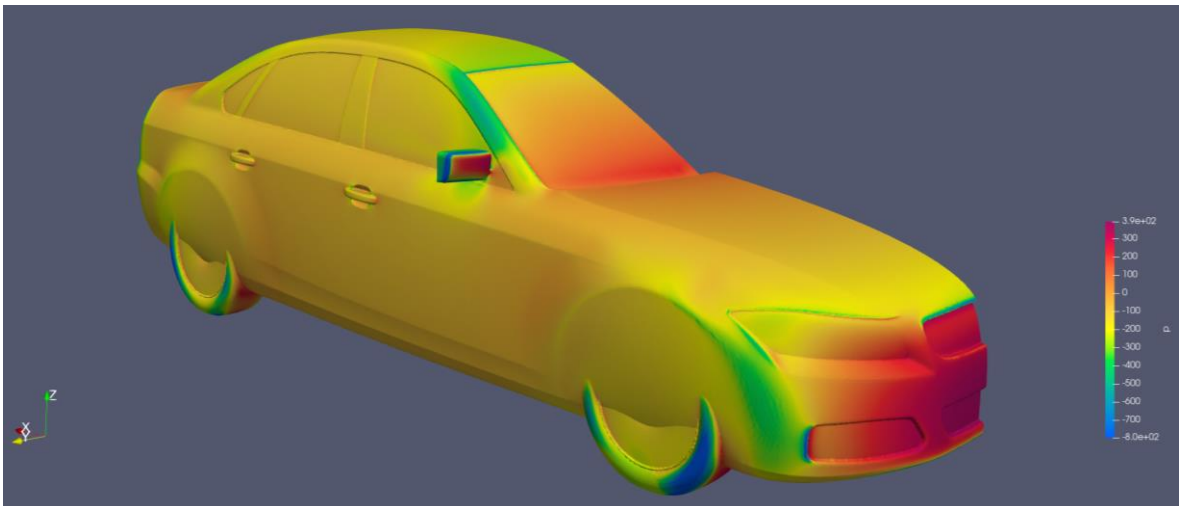


Figura.: 40: Representació de la Pressió [Pa] amb retrovisor

Es pot observar com la pressió que exerceix el retrovisor en la figura 40 és rellevant al voltant d'aquest. A més, a sobre del propi retrovisor es poden apreciar pressions igual d'elevades com les que té el frontal del vehicle que, per aquest cas, està totalment carenat no permetent l'entrada d'aire per cap part del frontal. Això és indicatiu, com, un objecte aparentment petit en comparació amb el cotxe, se li exerceix una pressió molt alta i, aquesta, al mateix temps genera un camp de pressions al voltant remarcable (es veurà més amb detall al llarg d'aquest mateix capítol). Destacable el canvi de pressions sobre el pilar A degut al retrovisor, sent valors negatius respecte la majoria de superfície del vehicle.

A continuació es poden veure en detall els comentaris fets per les figures 39 i 40. Molt important observar les “esferes” de turbulència al llarg del vidre lateral més enllà del propi retrovisor, així com les pressions fins -400 Pa per al pilar A, tant amb retrovisor com sense, tot i que el retrovisor modifica l'espectre de pressions al llarg de pilar A.

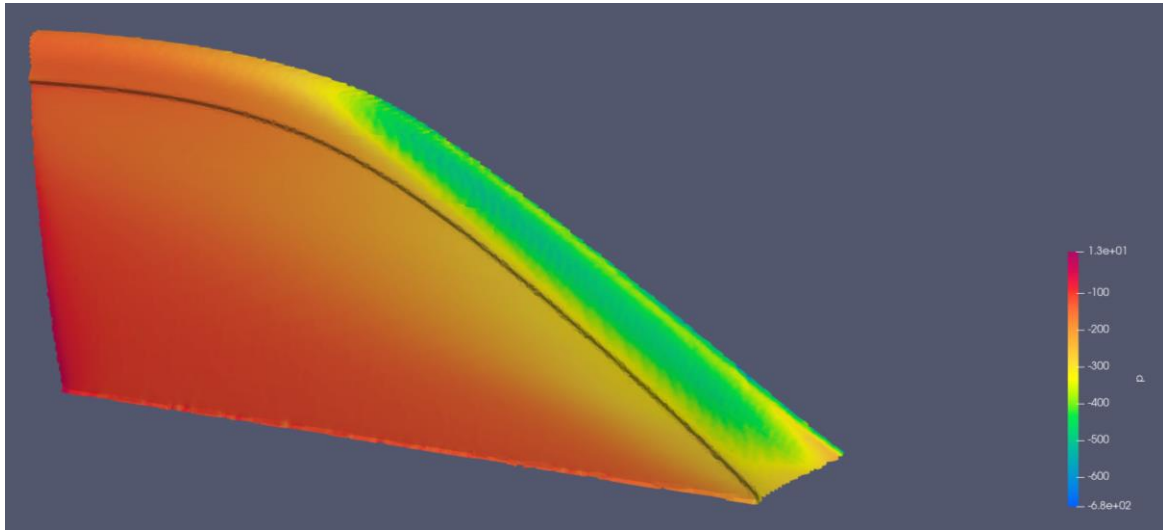


Figura.: 41: Detall de distribució de la Pressió [Pa] sense retrovisor

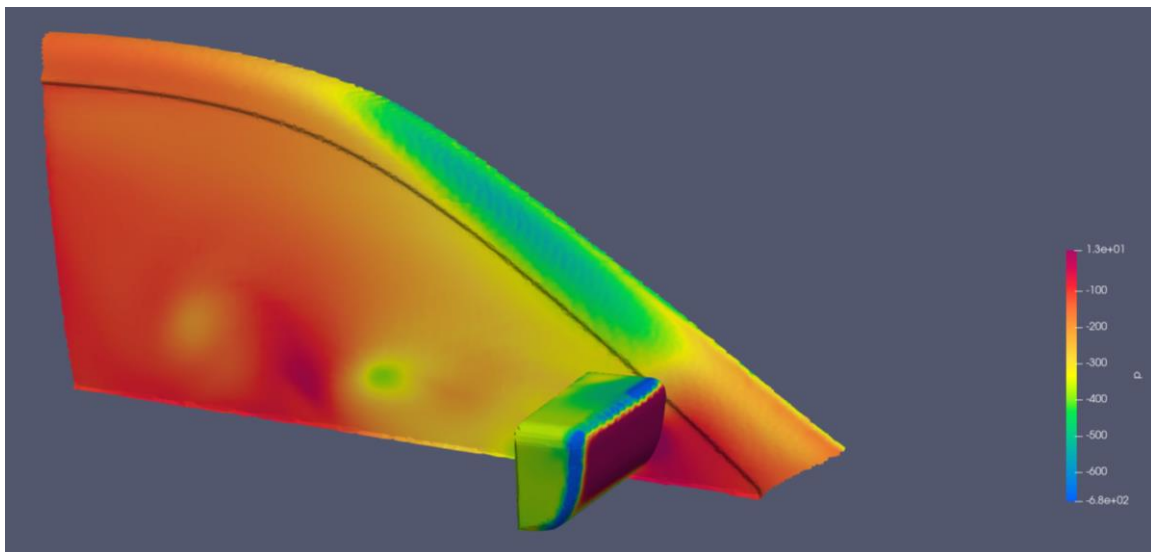


Figura.: 42: Detall de distribució de la Pressió [Pa] amb retrovisor

Seguint la mateixa línia de representació que en el cas estacionari, a les següents figures es pot apreciar una estela de flux de pressió al voltant del lateral del vehicle per poder veure quina és la pertorbació en quan a pressió del fluid sobre la superfície i quina estela deixa.

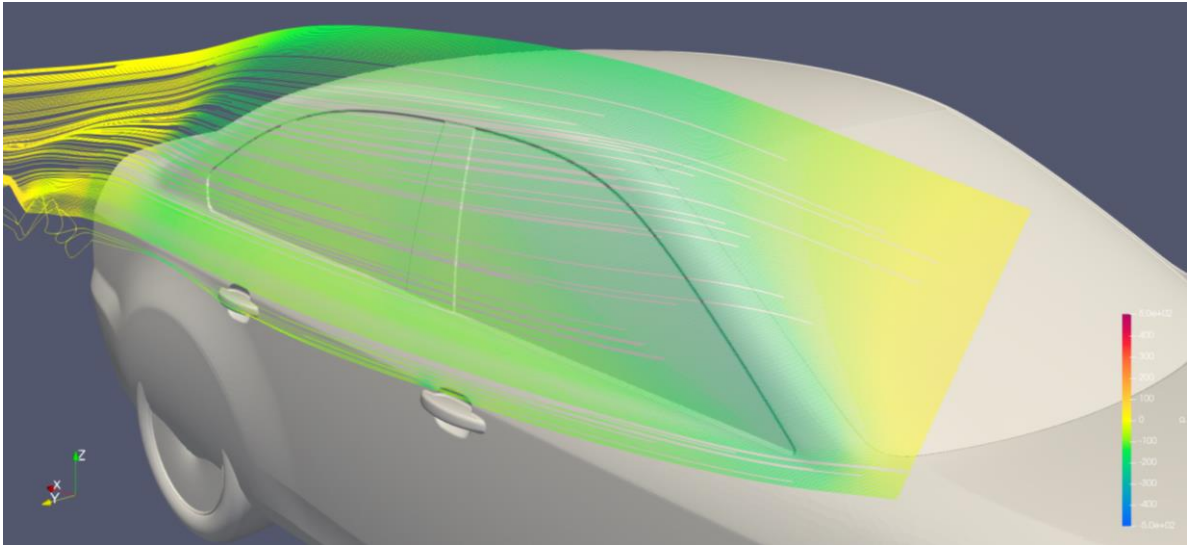


Figura.: 43: Detall 1 línies de Pressió [Pa] sense retrovisor

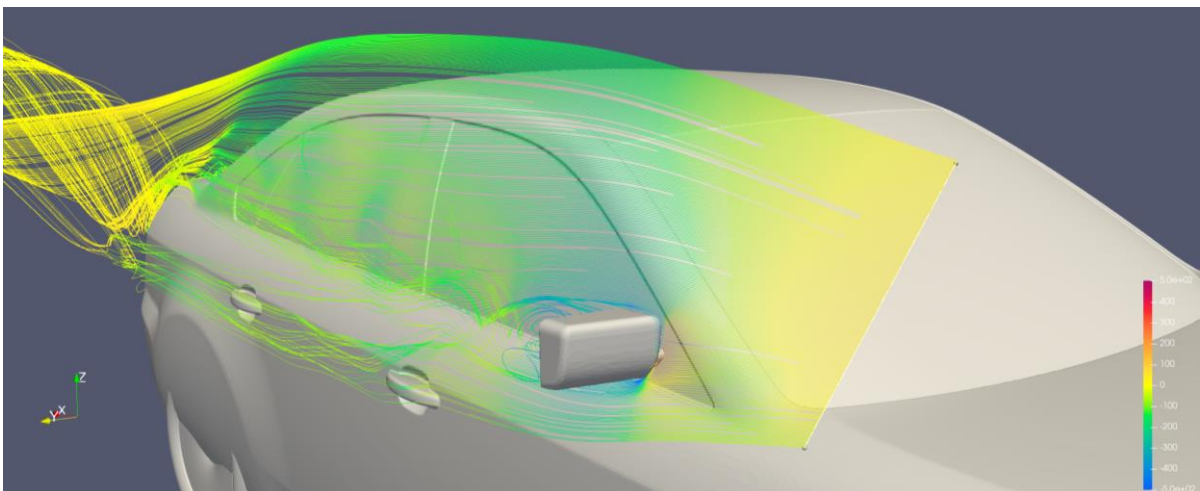


Figura.: 44: Detall 1 línies de Pressió [Pa] amb retrovisor

Tal i com es pot veure a la figura 44, l'estela de pressió al llarg del lateral és clarament molt més violenta que sense. Aquest punt és vital per entendre com es representaran els gràfics de pressió acústica i com s'instal·laran aquests punts de observació, anomenats micròfons.

Per a les dues últimes figures (Fig. 45 i 46), es busca tenir dos fluxos creuats centrats al voltant de la zona del retrovisor, per gràcies a aquestes esteles de turbulència, poder decidir amb més criteri on pot ser interessant instal·lar els punts d'observació per a estudiar els espectres SPL.

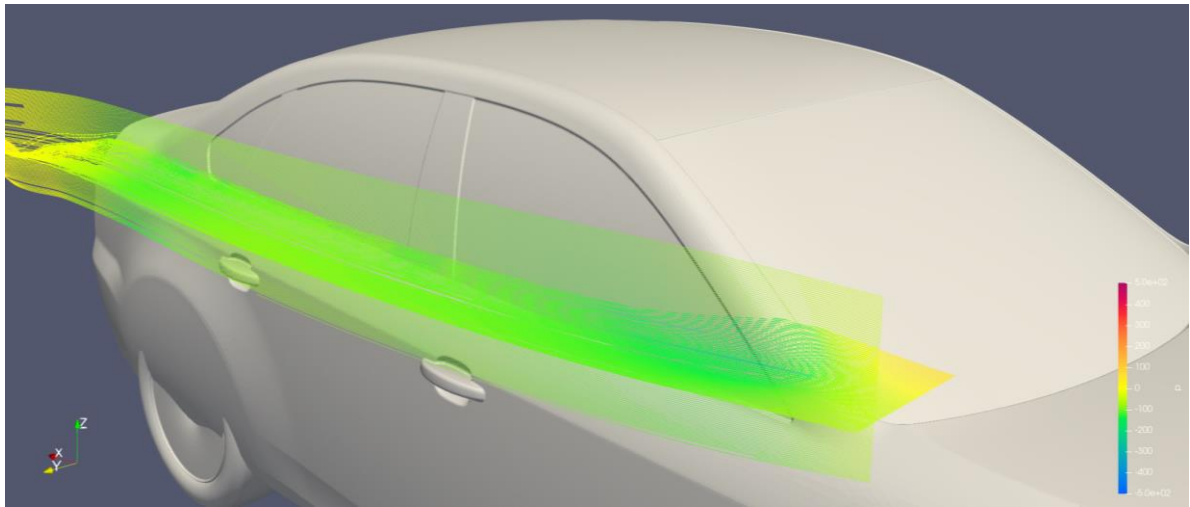


Figura.: 45: Detall 2 línies de Pressió [Pa] sense retrovisor

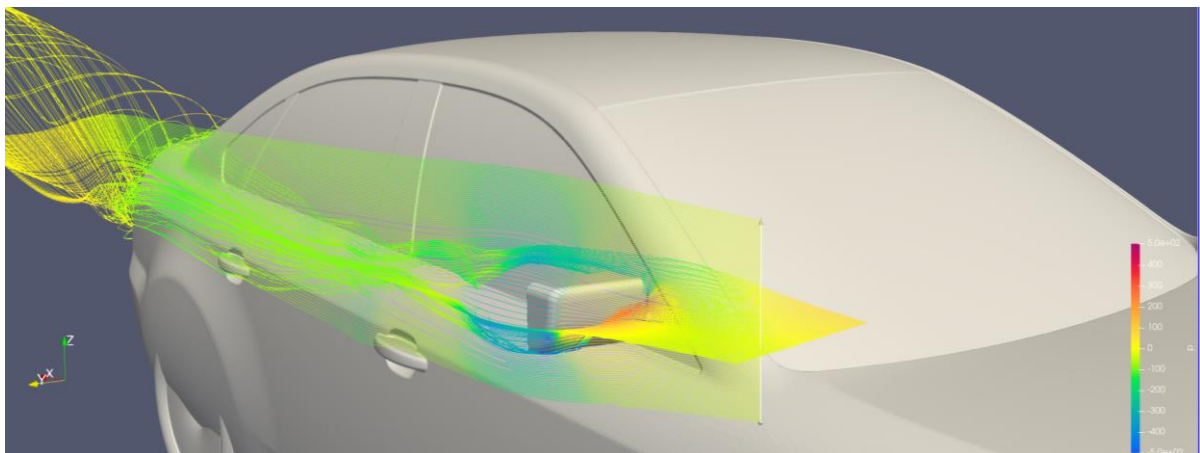


Figura.: 46: Detall 2 línies de Pressió [Pa] amb retrovisor

Novament, la pertorbació de la pressió deguda al retrovisor en la figura 46 és clarament visible i destacable. Poden observar com es propaga al llarg de tot el lateral del vehicle.

A les següents figures es pretén mostrar la col·locació espacial que s'ha decidit seguir en funció de les figures i resultats obtinguts en els punts anteriors, per així obtenir un seguiment de l'espectre de pressions acústiques al voltant del retrovisor i a prop de la finestra lateral que és on hi ha el punt d'estudi, que se suposa que hi ha assegut el conductor o copilot.

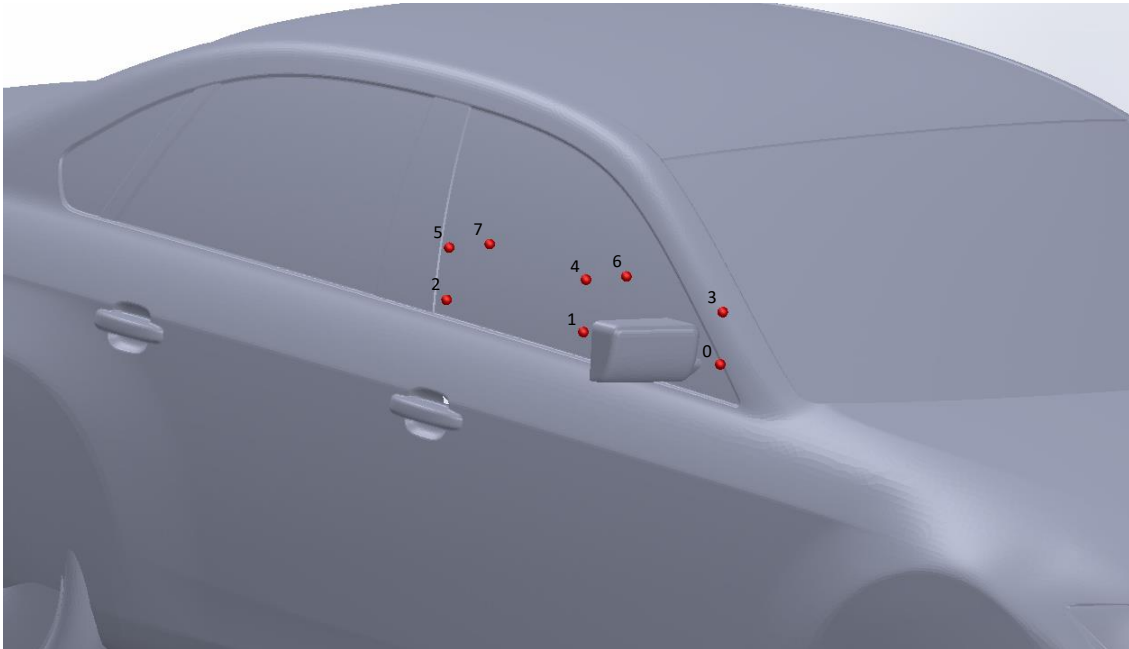


Figura.: 47: Col·locació espacial dels punts d'observació pel cas amb retrovisor

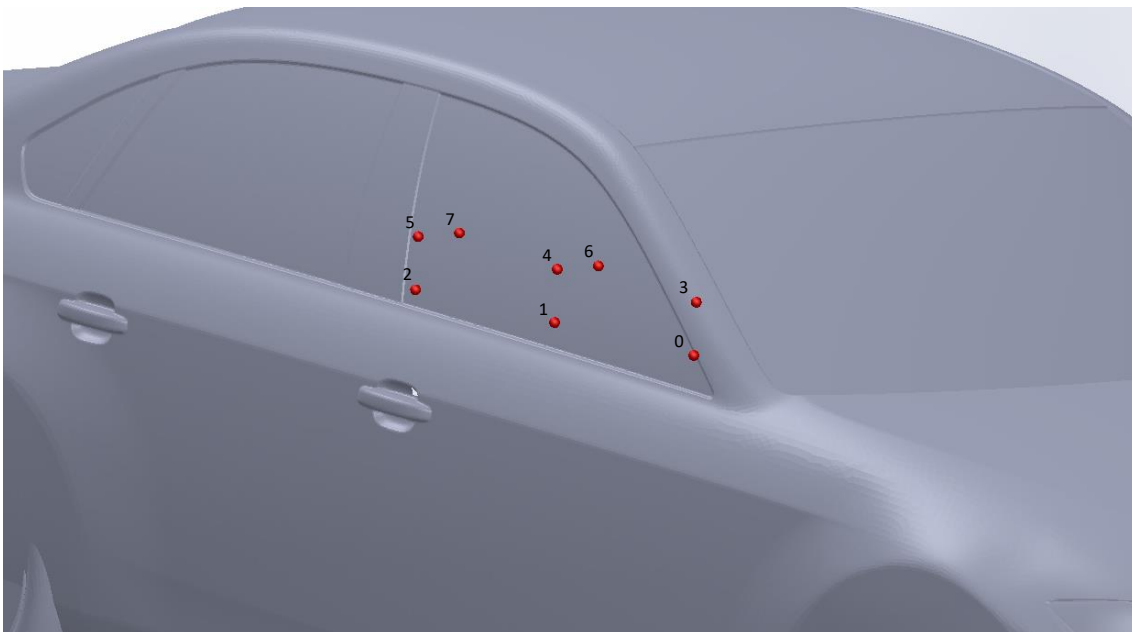


Figura.: 48: Col·locació espacial dels punts d'observació pel cas sense retrovisor

Cal destacar que en els punts 0 i 3, estan situats abans del retrovisor per corroborar quina és la incidència prèvia a les majors turbulències ja vistes en figures anteriors com la 46 i també són destacables els punts d'observació 6 i 7 per estar més allunyats del retrovisor i prop del vidre lateral i comprovar si per les zones que no estan directament darrera del retrovisor té un impacte tant o menys rellevant que els punts en la mateixa línia de flux que el retrovisor.

A continuació es mostraran els espectres SPL de cada punt de mesura presentat a la pàgina anterior. Sobre el mateix gràfic SPL es busca tenir la comparativa directa entre el cas amb retrovisor i sense. Es representa en vermell l'espectre pel cas sense retrovisor i en blau indicat amb una "R", l'espectre amb retrovisor.

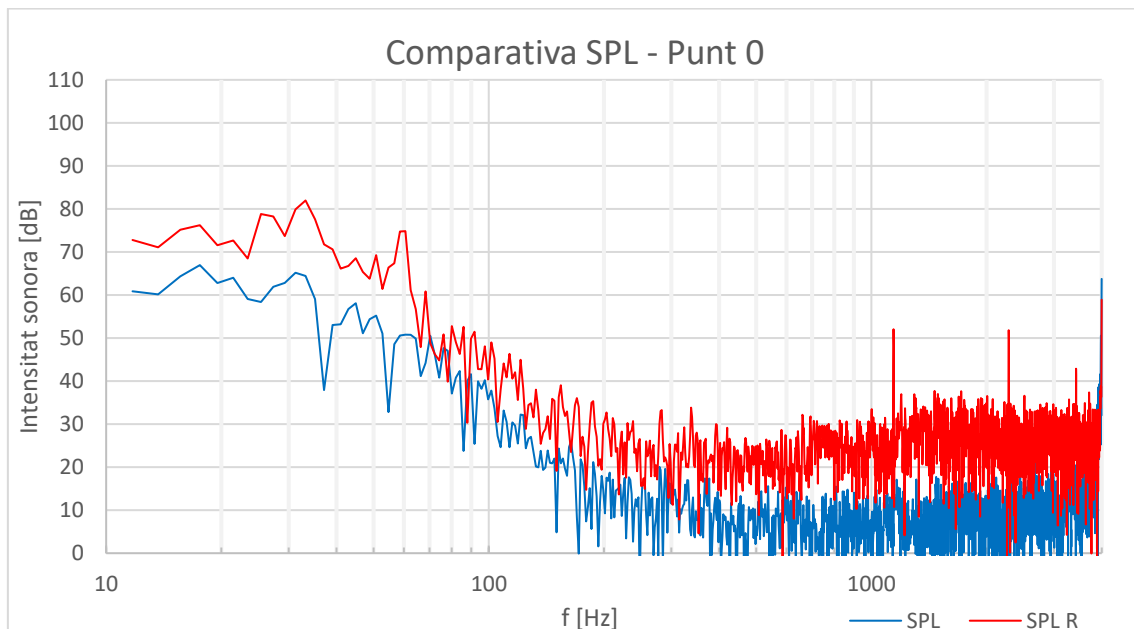


Figura.: 49: Comparativa SPL - Punt 0

Tal i com es pot veure en l'espectre, la intensitat en el cas amb retrovisor (blau), és superior en tot el rang de freqüències. Es podria dir que una mitjana de 20 dB, tenen la mateixa forma, fet que dona robustesa al model calculat. Apareix un pic a 60 Hz pel cas amb retrovisor, no gaire destacable però.

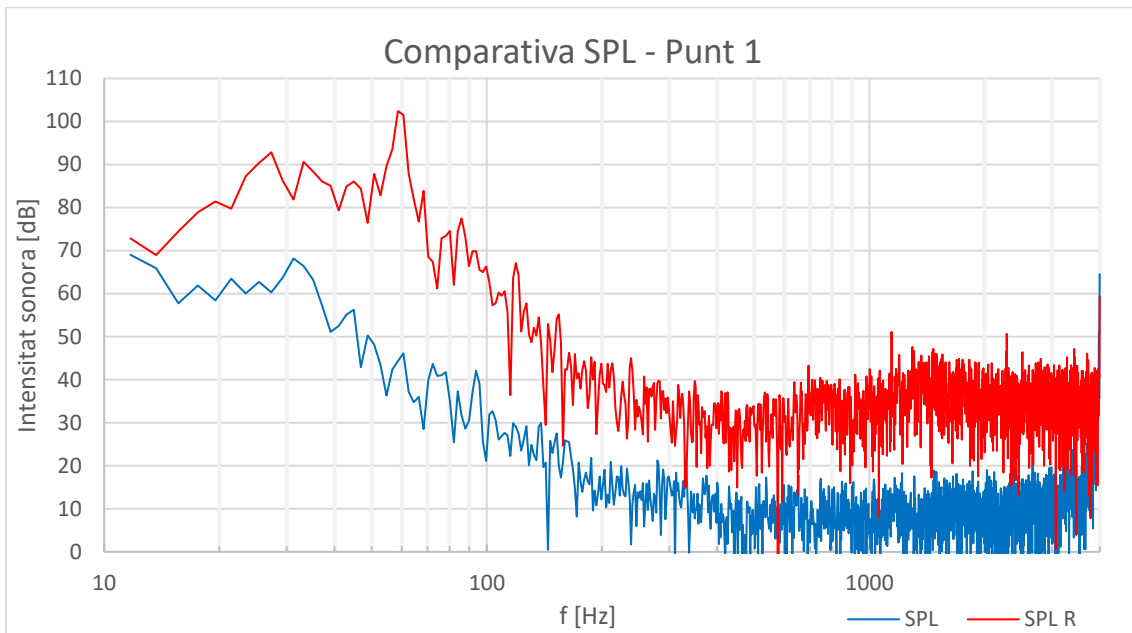


Figura.: 50: Comparativa SPL - Punt 1

Tal i com es pot observar en la figura 50, hi ha una diferència de més de 20 dB en quasi tot l'espectre acústic en favor del cas amb retrovisor, sent més visible un pic als 60 Hz de 100 dB. Ambdós espectres tenen un comportament equivalent a partir de 70 Hz en endavant.

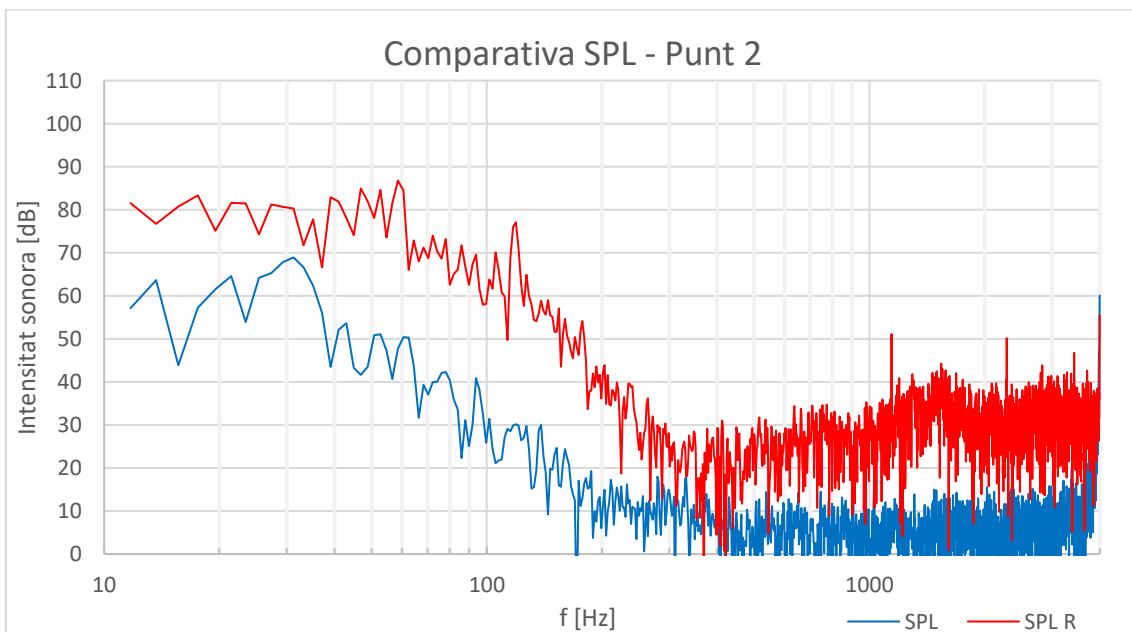


Figura.: 51: Comparativa SPL - Punt 2

A la figura 52 mostrada a la pàgina anterior es pot veure un comportament equivalent en ambdós espectre sent el cas amb retrovisor més elevat en tot el rang, sobretot en el cas de 50 a 200 Hz. Per la resta, es manté un comportament equivalent.

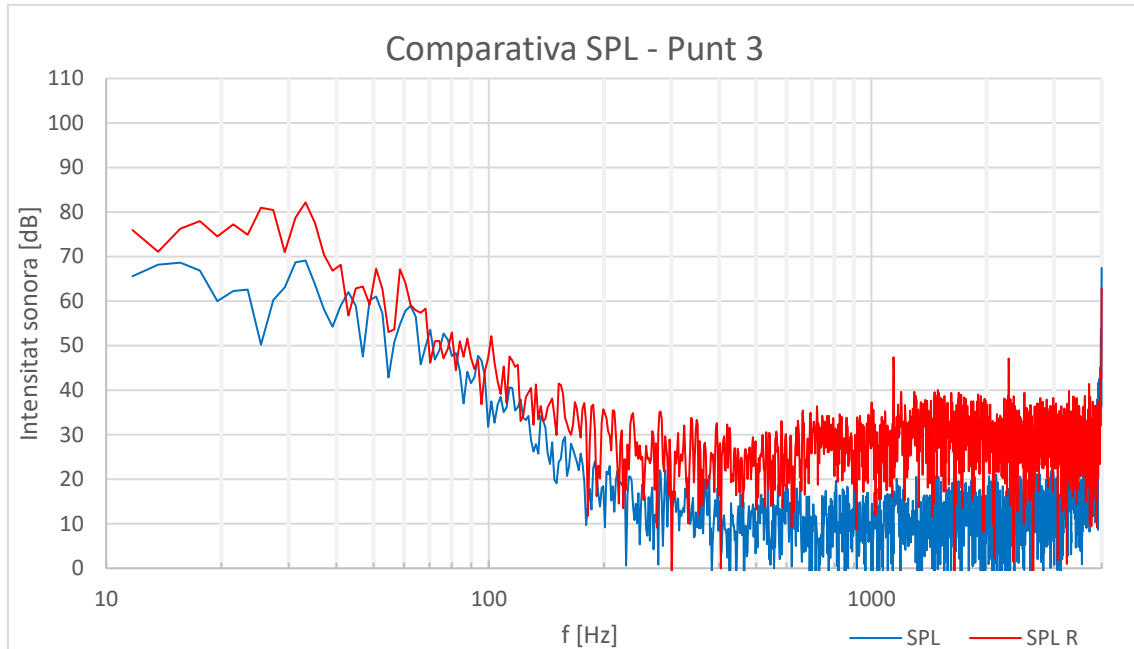


Figura.: 52: Comparativa SPL - Punt 3

En el cas de la figura 52, correspon al punt 3, que està situat abans del retrovisor respecte l'eix X (que es és la direcció en la que flueix el fluid), en aquest cas, tot i que el valor per al cas amb retrovisor (en blau) segueix sent més alt, la diferència és més subtil que en els punts que estan instal·lats posteriorment al retrovisor.

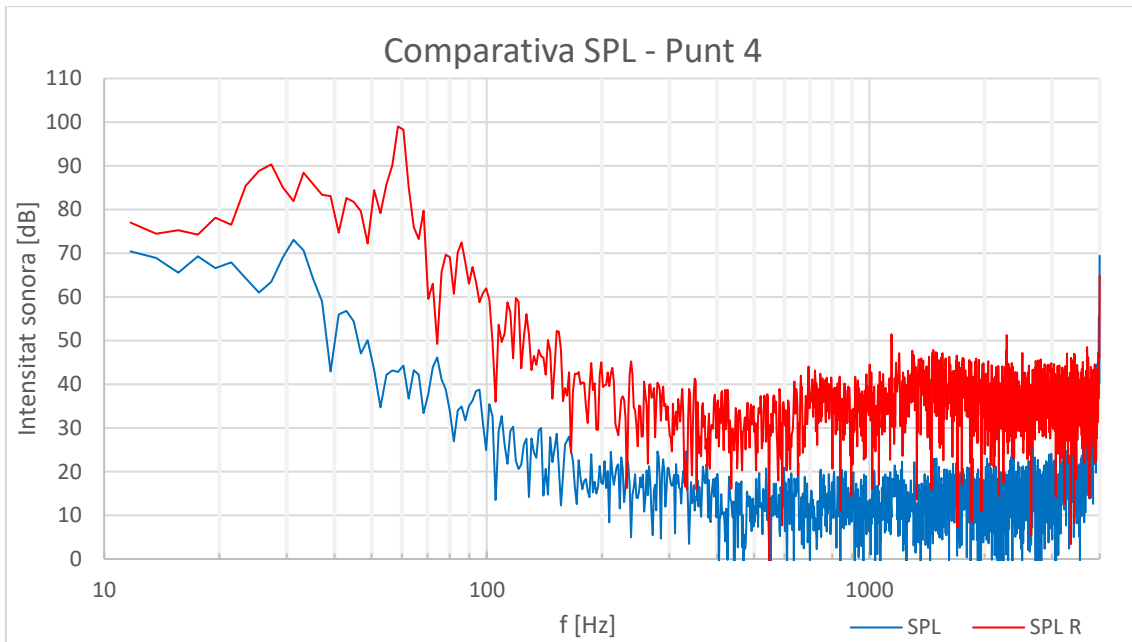


Figura.: 53: Comparativa SPL - Punt 4

En el cas de la figura 53, corresponent al punt 4 de observació, al ser un punt situat posterior al retrovisor en la direcció del flux, es poden apreciar clares diferències de pressió per part del cas amb retrovisor (sent superior per aquest últim cas). Torna a aparèixer el pic als 60 Hz.

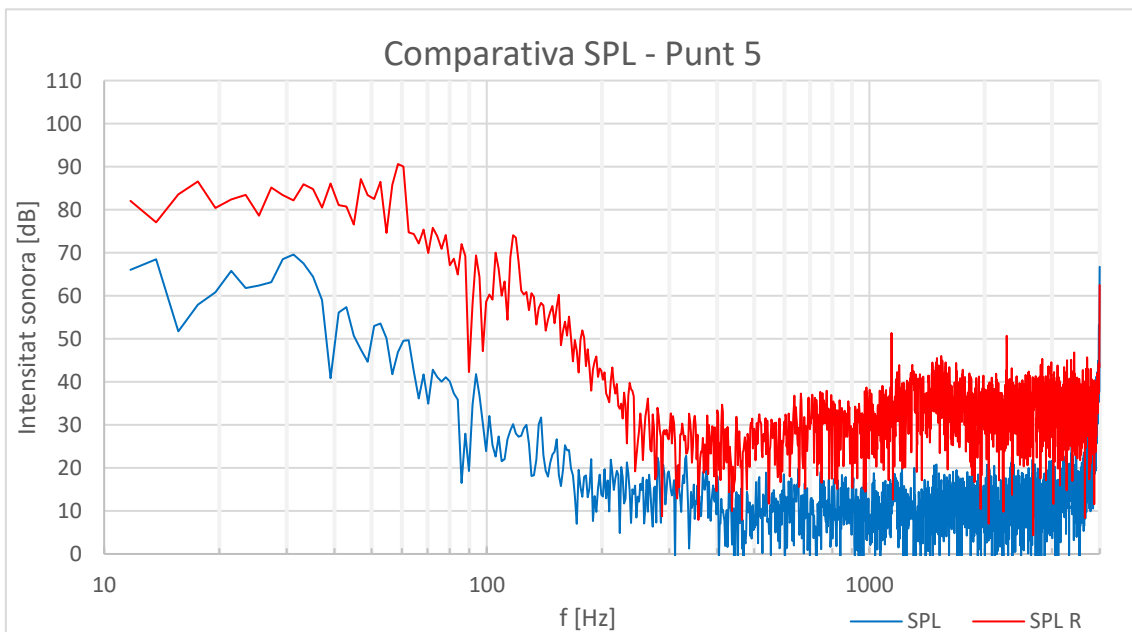


Figura.: 54: Comparativa SPL - Punt 5

Pel cas de la figura 54, es pot observar un comportament quasi idèntic al mostrat en la figura 53, això és degut a que el punt 5 es troba a continuació del punt 4 en la direcció del flux del fluid, així permet establir la atenuació al llarg de l'estela que pateix la turbulència acústica. Segueix sent superior en tots els rangs el cas amb retrovisor (en blau).

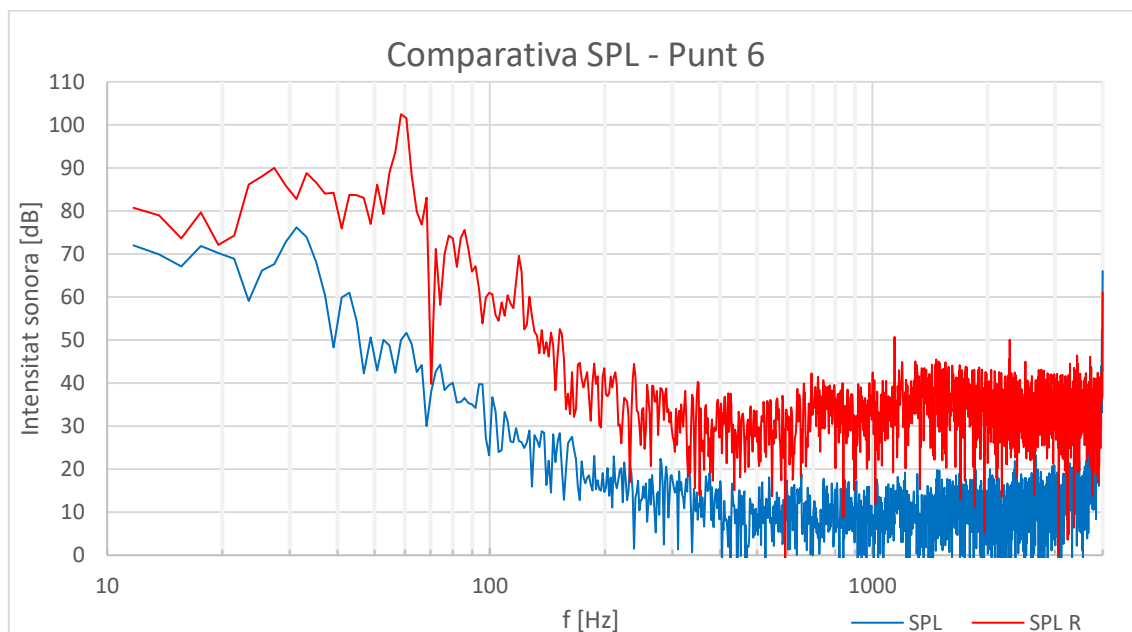


Figura.: 55: Comparativa SPL - Punt 6

En el cas del punt d'observació 6 corresponent a la figura 55, es pot veure igualment el pic puntual als 60 Hz i un comportament equiparable al punt 5, que estaria a prop del punt 6; aquest punt és interessant per que no es troba directament en la trajectòria del flux del retrovisor, però tal i com s'ha vist anteriorment, segueix estant afectat per la turbulència generada i en aquest espectre es pot comprovar al observar que el model amb retrovisor té una intensitat sonora superior en tot l'espectre, al voltant de 20 dB.

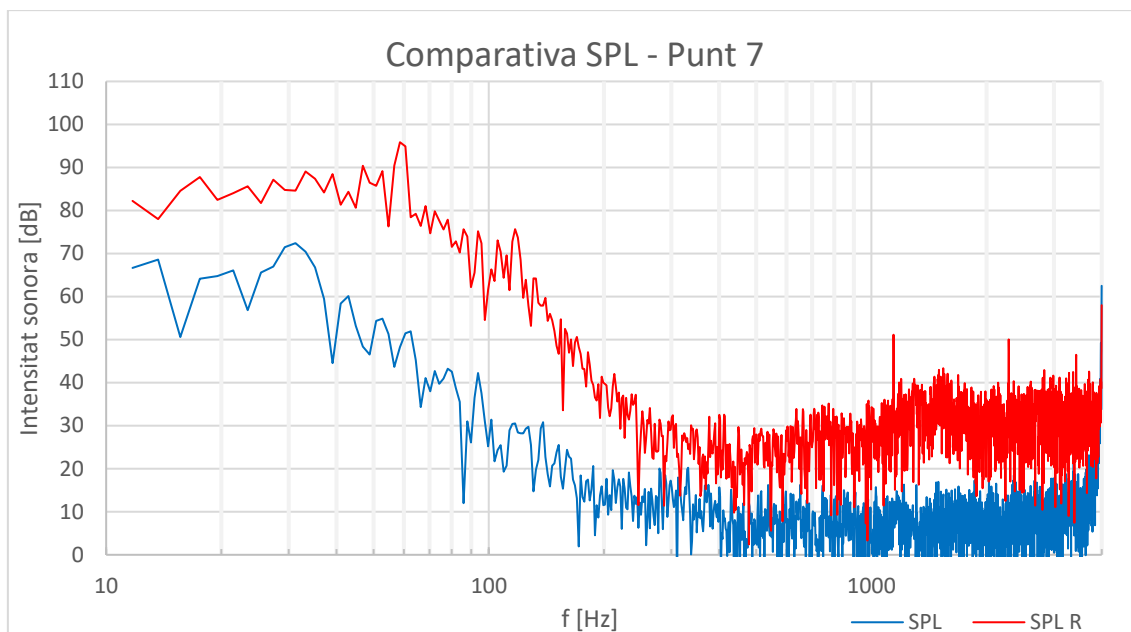


Figura.: 56: Comparativa SPL - Punt 7

En aquest últim punt, col·locat a continuació del punt 6, es veu una reducció de l'efecte turbulent del retrovisor a freqüències altes, mentre que per freqüències inferiors a 200 Hz, la diferència segueix sent igual de gran en comparació amb el punt 6, segueix apareixent el pic a 60 Hz, en menor mesura però.

A continuació es mostra una taula amb la mitjana logarítmica dels SPL per comparar a nivell numèric les diferències entre la versió amb i sense retrovisor.

Mitjana SPL (dB)	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Sense retrovisor	74.21	74.27	75.26	76.55	78.67	75.93	81.65	78.55
Amb retrovisor	88.61	106.63	95.53	89.07	103.49	98.90	106.33	102.48
Diferència (%)	+19.40	+43.57	+26.93	+16.36	+31.55	+30.25	+30.23	+30.46
Diferència (dB)	14.40	32.36	20.27	12.52	24.82	22.97	24.68	23.93

Taula 2: Mitjanes logarítmiques dels SPL

La taula 2 mostra de manera resumida numèricament (fent ús de la mitjana logarítmica) les diferències en % entre cada mesura de la simulació. Veient com els valors són superiors en el cas amb retrovisor, entre un 16 i un 43 %, sent el valor mig al voltant del 30 %. Sent entre 12 i 32 dB superior.

6. CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR

6.1. Conclusions i discussió de resultats

S'han plantejat una sèrie de objectius inicials els quals permeten, un cop obtinguts els resultats, discutir-los i extreure unes conclusions.

Un cop feta la recerca d'articles d'investigació de aeroacústica i de aerodinàmica, s'ha demostrat que elements com els retrovisors, alerons, antenes de radio i d'altres que poden sobresortir de la línia general de la carrosseria del cotxe generen turbulències significatives i, per tant, tenen un nivell sonor per sobre del soroll del vent amb la carrosseria del vehicle. Tal i com es mostra en l'estat de l'art, a altes velocitats (per sobre de 60 km/h) el soroll del vent és el so més predominant per als ocupants dels vehicles, fent-se més patent quant més gran és la velocitat. Com que aquest treball s'ha dut a terme amb la velocitat de fluid de 100 km/h, s'espera que el la pressió de l'aire contra la superfície del retrovisor del vehicle sigui prou alta com per generar turbulències.

Un altre dels objectiu aconseguits, ha estat la creació del model de simulació, que ha permès executar i modificar els paràmetres per poder adaptar-los al model del vehicle, així com a la geometria. S'han anat prenent les decisions durant l'evolució del refinat de la malla aplicant un criteri visual amb el Paraview i numèric amb els residus matemàtics. S'ha creat una malla d'estudi basada en una zona d'alta densitat de cel·les al voltant del retrovisor, s'ha treballat amb ímpetu en refinar la superfície, ja que es busquen uns resultats numèrics el més exactes possibles i el OpenFOAM és molt sensible a les arestes de les superfícies, fet que ha provocat que per aconseguir l'objectiu de tenir un model molt refinat, s'hagi hagut d'invertir part important de les hores a aconseguir-ho. Es pot concloure que la malla està el suficientment definida, reforçant-ho així amb els residus numèrics i els arxius de qualitat de la malla utilitzats com el "CheckMesh", on tots els paràmetres es donen per bons.

Per a assolir els objectius numèrics referents a la part estacionaria, s'ha establert un criteri d'acceptació per a valors inferiors a 10^{-3} , tal i com es pot observar en els gràfics de les simulacions finals, els valors estan lleugerament per sobre del llindar establert, no es podria considerar que no s'han superat els requisits de qualitat per que també s'ha tingut en compte factors de comportament matemàtic, prioritant que tinguin un comportament estable, tant

pels residus matemàtics com per a les forces i coeficients. Per confirmar aquests objectius aconseguits, es pot observar com les diferències, a nivell matemàtic, entre el model amb retrovisor i sense, són mínimes, fet que demostra la consistència de l'escenari creat i dels paràmetres matemàtics escollits.

Amb les forces i els coeficients aerodinàmics, es pot comprovar com, per exemple, el valor de C_d és lleugerament superior en el cas del model amb retrovisor, degut a que aquest es comporta com un obstacle pel flux i fa que la pressió del flux sobre la superfície del vehicle augmenti, fent així que el C_d ho faci també, creant una resistència subtilment major en el cas amb retrovisor. Tot i així, cal discutir que els resultats oscil·len en algun cas degut a que s'ha calculat utilitzant models de convergència i divergència matemàtica de segon ordre i, tot i ser models més precisos i menys difusius, són més oscil·latoris. Per la qual cosa, entren dins d'un comportament esperable i adequat. Els gràfics són molt estables gairebé des del principi, demostrant un cop més, que a nivell matemàtics, la simulació és precisa. Per acabar, es pot concloure que en el cas amb retrovisor es genera una estela de flux força turbulent al llarg de les finestres laterals.

Per al que representa la part aeroacústica, es busca aconseguir uns resultats numèrics equivalents a la part estacionaria, cal destacar que encara que sigui el mateix escenari de simulació, no té perquè tenir el mateix comportament matemàtic, ja que intervenen altres models matemàtics per resoldre la computació de mecànica de fluids. Els valors consigna són els mateixos que en l'anterior part. Segons els resultats finals es pot comprovar com les forces tenen uns valors pràcticament igual que en el cas estacionari, sent només més oscil·lant la força vertical, segurament degut al fet de tenir mig model de vehicle simulat. És destacable el comportament força estable dels resultats que permet establir un escenari matemàticament robust per poder aplicar el càlcul aeroacústic i fer més fiables els resultats. Pel cas amb retrovisor, la diferència podria ser subtil, però tenint en compte que les forces estan calculades per tot el vehicle (en aquest cas mig), és esperable que la incidència sigui relativament petita.

Referent al càlcul amb el PIMPLE, el nombre de Courant es manté en tota la simulació per sota de 4, que es un indicador de qualitat de la simulació, i per sota de 1 com a valor mig, situant-se al voltant de 0.024 per aquesta simulació. És clau per poder interpretar els resultats de la pressió acústica calculats mitjançant el posicionament dels 8 punts de "observació" al voltant del retrovisor (en el cas del model sense retrovisor, els punts estan al mateix lloc per poder tenir la comparació directa).

En quant als espectres de pressió sonora (SPL) cal discutir en més profunditat els resultats dels diferents punts per poder aportar més qualitat a les conclusions, al ser un dels principals objectius d'aquest treball.

Per als punts que estan situats anteriors al retrovisor en la direcció del fluid, es pot observar com la diferència entre ambdós gràfics és menor, aquest és el comportament esperable degut a que el fluid no ha contactat directament amb la superfície del retrovisor i la incidència és menor. Però és visible amb una diferència de més de 10 dB per que la superfície del retrovisor genera una zona de molt altes pressions i posteriorment, molt baixes pressions degut a la seva forma. Per tant, aquests resultats permeten identificar la gran incidència que té la pressió sobre la superfície del retrovisor no només en la direcció del fluid. Per als punts que estan instal·lats just després del retrovisor, seguint l'estela del fluid, es pot observar que la seva incidència és major, arribant a diferències de més de 30 dB, que és una intensitat acústica respecte no tenir retrovisor molt destacable. També és rellevant comprovar com els punts 2 i 5, que són els més allunyats en l'estela del retrovisor, mostren una molt subtil decaiguda de la pressió sonora, donant com a conclusió important que l'efecte del retrovisor es destacable i apreciable més enllà de les immediacions de la superfície d'aquest, fent que els efectes es mantinguin pràcticament al llarg de la finestra lateral del vehicle, donant peu a possibles interferències sonores per als ocupants de les places posteriors dels vehicles. Per als punts 6 i 7, s'ha volgut demostrar quin és el comportament fora de l'estela del retrovisor i comprovar quina incidència té i, tal i com s'ha pogut observar, els punts d'observació instal·lats a la part més superior de la finestra lateral, tenen una incidència superior a 20 dB, fet que tractant-se d'una escala logarítmica, és perfectament audible la diferència respecte sense retrovisor, confirmant així l'abast de la incidència acústica que té el retrovisor al voltant de la superfície que el rodeja, sent perfectament audible per tota la superfície de la finestra lateral del conductor o acompanyant i estenent-se a les finestres del darrera en menor mesura però audibles igualment.

Com a lectura general final es podria dir que per a les freqüències superiors a 100 Hz els espectres amb retrovisor són entre 20 i 25 dB superiors respecte sense retrovisor, tenint en compte que és una escala logarítmica, és una diferència clarament audible.

Finalment i no menys important per poder respondre a una pregunta clau que marca l'objectiu principal d'aquest treball, cal fer esmena de que els espectres acústics són escales de valors objectius i no tenen present un aspecte del so que ateny als humans, que és la psicoacústica. Tal i com s'ha observat a la figura 2 (pàgina 21), per poder donar uns valors acústics subjectius per als éssers humans s'ha de passar a l'escala psicoacústica que és l'escala de sensibilitat sonor que

perceben els humans. Exposa que el ésser humà és molt més sensible a sorolls de freqüències superiors a 100 Hz, donant solució al fet que els valors més alts obtinguts se situen a la franja inferior als 100 Hz, per la qual cosa no serem capaços de sentir-los amb tanta intensitat. Per tant, per aquest cas d'estudi no seran valors representatius, aquest fet elimina l'especial interès del pic de intensitat sonora al voltant dels 60 Hz, ja que equival amb la psicoacústica a 80 dB, sent un valor alt, però poc audible. Cal centrar-se en l'escala de valors a partir de 100 Hz, sent així que quan més alta la freqüència, més sensible som i, per tant, més representatiu és.

Finalment, es pot afirmar que els estudis fets numèricament en l'escenari de computació acústica, demostren clarament com la inclusió del retrovisor té una incidència en la pressió sonora de un 30%, corresponent a uns 20 dB aprox., a més aquesta diferència es dona en el rang de entre 100 i 4000 Hz, on els ésser humans som més sensibles als sorolls. Donant com a valor quantitatiu un volum sonor de uns 40 dB aprox. amb retrovisor i de 20 dB aprox. sense retrovisor. També caldria tenir present que es pot percebre un soroll greu al voltant dels 80 fonis (dB) que es audible però al ser molt greu, no predominarà respecte la resta de sorolls més aguts. També caldria comentar que s'ha pogut demostrar com l'impacte sonor no és només a l'estela del retrovisor i just a continuació, sinó que s'estén al llarg de tota la superfície del vidre lateral i arribant també al principi de les finestres laterals posteriors. No s'ha tingut en compte cap soroll ambient, cap soroll d'elements estructurals del vehicle ni cap mena d'amortiment per l'aïllament acústic del vehicle en sí. Són per tant, unes conclusions numèriques en un marc computacional concret.

6.2. Treball futur

Un cop exposades les conclusions i discutits els resultats obtinguts, cal marcar quins són els punts clau on enfocar la millora, ampliació i continuïtat d'aquest treball en vista als resultats obtinguts:

- S'hauria de fer un estudi de convergència de malla, per corroborar amb més certesa objectiva que la malla és independent dels resultats obtinguts.
- Fent ús de més recursos computacionals, seria adequat simular tota la geometria sencera per comprovar si el comportament del fluid és simètric o no i el comportament dels moments de les forces serien més rellevants llavors.

- Seria interessant poder simular un espectre sonor més ampli i poder arribar a 6000 Hz com a mínim per poder arribar a tot el rang de màxima sensibilitat psicoacústica pels humans i corroborar el comportament de l'espectre sonor a altes freqüències. Ja que és destacable comentar que s'aprecia un pic al voltant dels 4000 Hz per als SPL obtinguts sense retrovisor, això pot ser degut a turbulències generades pel pilar A del vehicle o per un error amb els filtres de la transformada de Fourier, per comprovar això seria clau ampliar el rang dels espectre sonors representats. Aquest fet multiplicaria per molt el temps de simulació així com els recursos necessaris.
- Un cop conclòs que el retrovisor té una incidència numèrica en la percepció acústica dels escenaris simulats, seria interessant poder simular varis escenaris paral·lels amb les mateixes condicions computacionals però instal·lant retrovisors amb diferents formes. Per poder així, comprovar la dependència de la forma del retrovisor amb els resultats obtinguts.
- Finalment, és de vital importància per complementar i dotar de criteri científic complet, fer un estudi experimental amb les mateixes condicions de simulació; al cap i a la fi, els estudis numèrics no tenen cap validesa real si no es poden contrastar amb un escenari experimental equivalent.

AGRAÏMENTS

M'agradaria agrair l'acompliment d'aquest treball de TFM al meu director, en Robert Castilla, pels consells que m'ha donat com a persona i tutor. Gràcies a la perseverança i a creure insistentment en que el OpenFOAM, al final, se li acaba agafant estima si es té la paciència adequada.

Especial menció a la persona que ha estat amb mi des de principis d'any donant suport tècnic incansablement i aguantant els llarguíssims dubtes i preguntes, Pere Valls Badia, sense ell, aquest treball no estaria acabat.

I per últim, i des de un punt de vista humà, donar les gràcies als meus pares, que han estat el motor per no defallir ni un sol moment en tota la trajectòria universitària i que han estat, en silenci, les persones que han cregut més en mi, així que gràcies i mil gràcies per no rendir-vos ni un sol moment i creure que estava al lloc adequat, aquest treball el dedico en exclusiva a ells, va per vosaltres, papes.

Dit això, cal destacar que, quan pensava que la UPC de Terrassa no em podia donar cap disgust més i em pensava que ja no em podria enfonsar més a nivell personal i acadèmic, vaig descobrir el que ha estat el tresor més ben amagat de la ESEIAAT, el grup d'amics que ha estat el pilar de suport per arribar al final i aguantar cada dia sense fracassar, en especial dedicació durant la realització d'aquest treball a: Franc Vives, Oscar Sánchez i a Arnau Pont per la paciència amb el CFD.

Finalment, i saltant-me els protocols de la UPC, donar gràcies a la ESEIAAT per, sense ser mèrit seu, donar-me el que ha estat, i serà, la millor recompensa per tots aquests anys estudiant: la felicitat, la companyia i la connexió de sentir-se ple i afortunat d'haver conegut a la Meritxell Ballester.

BIBLIOGRAFIA

- [1] OpenCFD Ltd., «OpenFOAM - The open source CFD toolbox,» ESI Group, 30 Juny 2020. [En línia]. Available: <https://www.openfoam.com/>. [Últim accés: Gener 2021].
- [2] G. García, «EURO 7: Europa va de cabeza a la prohibición de los coches de combustión en 2025,» 19 Novembre 2020. [En línia]. Available: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/sector/euro-7-europa-prohibicion-coches-combustion-2025/20201118180535040100.html>. [Últim accés: Abril 2021].
- [3] E. Pérez, «Euro 7 señala el fin de los motores de combustión: un estricto límite que ha llevado a Audi a abandonar sus desarrollos en diésel y gasolina,» 18 Març 2021. [En línia]. Available: <https://www.xataka.com/vehiculos/euro-7-senala-fin-motores-combustion-estricta-norma-que-ha-llevado-a-audi-volvo-a-abandonar-sus-desarrollos-diesel-gasolina>. [Últim accés: Abril 2021].
- [4] European Commission, «European vehicle emissions standards - Euro 7 for cars, vans, lorries and buses,» 03 Juny 2020. [En línia]. Available: <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12313-European-vehicle-emissions-standards-Euro-7-for-cars-vans-lorries-and-buses>. [Últim accés: Abril 2021].
- [5] D. Pund, «Why car designers are waging war against side mirrors,» 26 Juny 2019. [En línia]. Available: <https://www.caranddriver.com/features/columns/a28120245/car-side-mirror-camera-design/>. [Últim accés: Març 2021].
- [6] N. Oette i D. Sims-Williams, «Automotive Aeroacoustics: An overview». Patent 10.1177, 2017.
- [7] X. Hu, P. Guo, Z. Wang, J. Wang, M. Wang, J. Zhu i D. Wu, «Calculation of external vehicle aerodynamic noise based on LES subgrid model». Patent 10.339, 9 Abril 2020.
- [8] H. M. Frank i C.-D. Munz, «Direct aeroacoustic simulation of acoustic feedback phenomena on a side-view mirror,» de *Journal of Sound and vibration*, Stuttgart, 2016.
- [9] A. H. Dawi i R. A. Akkermans, «Direct noise computation of a generic vehicle model using a finite volume method,» de *Computers and Fluids*, Braunschweig, 2019.
- [10] A. H. Dawi i R. A. Akkermans, «Spurious noise in direct noise computation with a finite volume for automotive applications,» de *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Braunschweig, 2018.

- [11] M. Helfer, «General aspects of vehicle aeroacoustics,» de *Lecture Series Road Vehicle Aerodynamics*, Stuttgart, 2005.
- [12] M. Riegel, «Wind noise - A dominant source for in-cabin noise in comparison to other noise sources of a vehicle». Stuttgart Patent D-70569, 25 Març 2004.
- [13] E. Sjöberg, *Implementation of Aeroacoustic Methods in OpenFOAM*, Stockholm: SKOLAN FÖR TEKNIKVETENSKAP, 2016.
- [14] J. S. Vázquez, «Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas,» 30 Diciembre 2004. [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+2.pdf>. [Últim accés: Febrer 2021].
- [15] A. Bayón, «Navier-Stokes Equations,» Març 2020. [En línea]. Available: <https://cfid.blogs.upv.es/introduction/navier-stokes-equations/>. [Últim accés: Febrer 2021].
- [16] J. Redfern, «The most aerodynamic new cars you can buy,» 31 Juliol 2018. [En línea]. Available: <https://www.motoringresearch.com/car-news/most-aerodynamic-new-cars/>. [Últim accés: Març 2021].
- [17] B. Nebenführ, *OpenFOAM: A tool for predicting automotive relevant flow fields*, Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2010.
- [18] Wikipedia, «Finite volume method,» 05 Abril 2021. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Finite_volume_method&oldid=1016103617. [Últim accés: Abril 2021].
- [19] Wolf Dynamics, *Finite Volume Method: A Crash introduction*, Arlington, 2020.
- [20] P. V. Badia, *Numerical and Experimental Study of Noise Generated by an HVAC System of a Passenger Car*, Terrassa: UPC, 2020.
- [21] J. Rosa, *Fundamentos físicos del sonido y acústica*, San Cristóbal de La Laguna: Universidad de la Laguna, 2009.
- [22] Wikipedia, «Aeroacoustic analogy,» 12 Diciembre 2020. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Aeroacoustic_analogy&oldid=993781288. [Últim accés: Març 2021].

- [23] OpenFOAM: User Guide, «Curle,» 22 Desembre 2020. [En línia]. Available: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-fos-field-Curle.html>. [Últim accés: Febrer 2021].
- [24] Wikipedia, «OpenFOAM,» 17 Abril 2021. [En línia]. Available: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=OpenFOAM&oldid=134837027>. [Últim accés: Abril 2021].
- [25] C. Greenshields, «CFD Direct OpenFOAM v8 User Guide: 3 Applications and libraries,» 21 Juliol 2020. [En línia]. Available: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v8-applications/#x8-650003>. [Últim accés: Novembre 2020].
- [26] J. Lehmer, *Ten Steps to Linux Survival - Essentials for Navigating the Bash Jungle*, O'Reilly Media, 2016.
- [27] J. Nagy, «CFD basics,» 17 Setembre 2014. [En línia]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=mGSUIXye9j4&list=PLcOe4WUSsMkH6DLHpsYyveaqjKxnEnQqB>. [Últim accés: Octubre 2020].
- [28] T. Ong, «OpenFoam for Windows Newbie Guide,» 01 Juny 2019. [En línia]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=bP-n6-O22-Q&list=PLhPfnw4V4_YRhBU4IqSaToQ8_X543YQsz. [Últim accés: Octubre 2020].
- [29] T. Ong, «OpenFOAM Intermediate 1 - snappyHexMesh Introduction,» 17 Juliol 2019. [En línia]. Available: https://www.youtube.com/playlist?list=PLhPfnw4V4_YSpWX6mSOlwWEOKVa6i_iuE. [Últim accés: Novembre 2020].
- [30] Engys, *A Comprehensive Tour of snappyHexMesh*, Engys Ltd., 2012.
- [31] OpenCFD Ltd, «4.3 Mesh generation with the blockMesh utility,» ESI Group, [En línia]. Available: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/blockMesh.php>. [Últim accés: Setembre 2020].
- [32] C. Greenhields, «OpenFOAM v6 User Guide: 3.4 Running applications in parallel,» 10 Juliol 2018. [En línia]. Available: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v6-running-applications-parallel/>. [Últim accés: Novembre 2020].
- [33] Wolf Dynamics, *Mesh generation using snappyHexMesh*, 2017.
- [34] P. Schretter, *SnappyHexMesh Basic Training multi Region meshing simulation of heat transfer with chtMultiRegionFoam*, TU Wien, 2015.
- [35] OpenfoamWiki, «RenameMesh,» 03 Setembre 2012. [En línia]. Available: <https://openfoamwiki.net/index.php/RenameMesh>. [Últim accés: Octubre 2020].

- [36] OpenfoamWiki, «SimpleFoam,» 06 Gener 2019. [En línia]. Available: <https://openfoamwiki.net/index.php/SimpleFoam>. [Últim accés: Octubre 2020].
- [37] T. Holzmann, «Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFOAM - The Basics for Numerical Simulations». Patent 10.13140, 3 Novembre 2019.
- [38] Department of Mechanical Engineering, «DrivAer Model - TUM,» 2011. [En línia]. Available: <https://www.mw.tum.de/en/aer/research-groups/automotive/drivaer/>. [Últim accés: Octubre 2020].
- [39] Wikipedia, «Sound pressure,» 12 Abril 2021. [En línia]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Sound_pressure&oldid=1017306010. [Últim accés: Abril 2021].
- [40] M. Morell, P. Gil-Loyzaga i R. Pujol, «Campo auditivo humano,» 06 Juny 2018. [En línia]. Available: <http://www.cochlea.org/es/sonidos/campo-auditivo-humano>. [Últim accés: Març 2021].
- [41] Wikipedia, «Espectro audible,» 03 Novembre 2019. [En línia]. Available: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Espectro_audible&oldid=121031056. [Últim accés: Març 2021].
- [42] C. Greenhields, «OpenFOAM v6 User Guide: 4.4 Numerical schemes,» 10 Juliol 2018. [En línia]. Available: <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/v6-fvschemes/>. [Últim accés: Octubre 2020].
- [43] OpenfoamWiki, «OpenFOAM guide/The PIMPLE algorithm in OpenFOAM,» 27 Agost 2018. [En línia]. Available: https://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM_guide/The_PIMPLE_algorithm_in_OpenFOAM. [Últim accés: Gener 2021].
- [44] A. Mojra, *Variants of SIMPLE: SIMPLER & SIMPLEC*, Tehran: K. N. TOOSI University, 2010.
- [45] JJ Technical Solutions, «Aerodynamic flow over a car,» 19 Juliol 2016. [En línia]. Available: <https://es.slideshare.net/MechieProjects/aerodynamic-flow-over-a-car>. [Últim accés: Novembre 2020].