



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

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

Estudio del efecto rebote en los monoplazas de Fórmula 1

Documento:

Memoria

Autor:

Kevin Fernández Cerrato

Director/Directora - Codirector/Codirectora:

Robert Castilla López

Titulación:

Grado en ingeniería mecánica

Convocatoria:

Otoño, 2022.

TRBAJO DE FIN DE ESTUDIOS



Resumen

La Fórmula 1 fue testigo en 2022 del cambio de reglamentación técnica más importante en la historia del automovilismo. El objetivo, simplificar aerodinámicamente los monoplazas con tal de reducir la estela de aire sucio generada por estos y promover mayor competencia y lucha cuerpo a cuerpo. Pero lo que no esperaba nadie era que estos nuevos prototipos sufrieran exagerados rebotes en medio de una recta a velocidades muy elevadas, lo que fue llamado por todo el mundo como rebote, o marsopeo coloquialmente hablando.

El presente estudio analizará con detenimiento este fenómeno en base a un previo entendimiento de los fundamentos básicos de la aerodinámica y mecánica de fluidos en monoplazas de competición. Por ello, se investigarán las causas de este efecto desde su vertiente aerodinámica y mecánica, y que aspectos del nuevo reglamento lo desencadenaron.

Además, se estudiará por medio de técnicas de CFD la correlación existente entre la altura de manejo del coche y la aparición del fenómeno, siendo este último fuertemente influido por las nuevas regulaciones técnicas. La utilización, pues, de herramientas computacionales como CFD es ventajosa de cara a visualizar mediante métodos numéricos como un incremento de tan solo 15 mm del suelo del monoplaza puede reportar pérdidas de carga aerodinámica de aproximadamente 40 N, siendo no muy eficiente dicha propuesta resolutoria desde el punto de vista del rendimiento en pista del monoplaza. No solo eso, sino que la rigidez del muelle *heave* y el uso que se haga de este juega un papel crucial de cara a la erradicación total del marsopeo.

Abstract

Formula 1 witnessed in 2022 the largest and most important technical rules change in the history of motorsport. The aim was at simplifying radically the car's aerodynamics to reduce the dirty air wake generated, and thus, promoting better racing and wheel to wheel battles. However, nobody expected that these new 2022 cars suffered somehow violent bouncing down any straight at very high speeds. Rapidly, this phenomenon was named *porpoising* and was one of the main talking points along the 2022 F1 season.

The present study analyzes deeply this effect based on a previous understanding of the basic concepts of aerodynamics and fluid mechanics in motorsport cars. Therefore, a breakdown of it is required to essentially understand how it is triggered both aerodynamically and mechanically.

Furthermore, it is evaluated by means of CFD techniques the existent correlation between the ride height of the car and the trigger of porpoising, which is strongly influenced by the new 2022 technical rules change. The usage of computational tools like CFD allows to thoroughly visualize, by means of numerical methods, how drastically a 15 mm floor raise may report downforce losses up to 40 N. Thus, this alternative is not quite efficient at aiming to minimize porpoising from an overall car performance point of view, and that's not all, as it will be studied how a big role the heave spring stiffness and usage plays at attempting to reduce the enormous suspension jounce.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

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

ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE ABREVIATURAS/ GLOSARIO	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETO.....	1
1.2 ALCANCE	1
1.3 REQUERIMIENTOS.....	2
1.4 JUSTIFICACIÓN	3
2 FUNDAMENTOS BÁSICOS	4
2.1 CONCEPTOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS	4
2.1.1 <i>CONCEPTO DE FLUIDO</i>	4
2.1.2 <i>FLUJO ESTACIONARIO Y LÍNEA DE CORRIENTE</i>	4
2.1.3 <i>FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO</i>	5
2.1.4 <i>COMPRESIBILIDAD DEL FLUJO</i>	6
2.1.5 <i>CAPA LÍMITE</i>	6
2.1.6 <i>SEPARACIÓN CAPA LÍMITE</i>	7
2.1.7 <i>FUERZAS AERODINÁMICAS</i>	8
2.1.8 <i>FUERZA DE SUSTENTACIÓN</i>	9
2.1.9 <i>FUERZA DE RESISTENCIA AL AVANCE</i>	11
2.2 AERODINÁMICA EN UN FÓRMULA 1	12
2.2.1 <i>FUERZAS AERODINÁMICAS</i>	12
2.2.2 <i>VÓRTICES</i>	14
2.2.3 <i>ELEMENTOS AERODINÁMICOS DEL ALERÓN TRASERO</i>	16
2.2.4 <i>DIFUSOR Y EFECTO SUELO</i>	17
2.2.5 <i>BARGEBOARDS</i>	18
3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA AERODINÁMICA DE LOS F1	20
3.1 AÑOS 50	20
3.2 AÑOS 60	21
3.3 AÑOS 70	22
3.4 AÑOS 80	23
3.5 AÑOS 90	24
3.6 AÑOS 2000	24
3.7 ÚLTIMA DÉCADA	26
4 MARSOPEO Y SUS CAUSAS	29
4.1 NATURALEZA AERODINÁMICA	30
4.2 NATURALEZA MECÁNICA	37
5 RELACIÓN DEL REGLAMENTO DE 2022 CON EL EFECTO MARSOPA.....	41
5.1 CAMBIOS AERODINÁMICOS RELEVANTES.....	43
5.1.1 <i>ESTUDIO NOVEDADES DEL EJE DELANTERO</i>	44
5.1.2 <i>ESTUDIO NOVEDADES DEL DIFUSOR</i>	45
5.1.3 <i>ESTUDIO NOVEDADES DEL FONDO PLANO</i>	47
5.2 CAMBIOS MECÁNICOS RELEVANTES	49
5.3 RESTRICCIONES DE TÚNEL DE VIENTO RELEVANTES	50



6	EVOLUCIÓN DEL MARSOPEO A LO LARGO DEL AÑO.....	53
6.1	INTERVENCIÓNES DE LA FIA	53
6.2	ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DEL MARSOPEO EN LOS EQUIPOS	56
6.3	CONSECUENCIAS Y RIESGOS EN LA SALUD	63
7	SIMULACIÓN CFD	67
7.1	SOFTWARE SIMSCALE	68
7.2	PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN	69
7.2.1	<i>PREPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA</i>	69
7.2.2	<i>DEFINICIÓN DEL DOMINIO DE FLUJO</i>	70
7.2.3	<i>PARÁMETROS GENERALES DE LA SIMULACIÓN</i>	71
7.2.3.1	TIPO DE ANÁLISIS Y MATERIAL	71
7.2.3.2	MODELO DE TURBULENCIA	71
7.2.3.3	DEPENDENCIA DEL TIEMPO.....	72
7.2.3.4	ALGORITMO	72
7.2.4	<i>CONDICIONES INICIALES</i>	73
7.2.5	<i>CONDICIONES DE CONTORNO</i>	73
7.2.5.1	ENTRADA	73
7.2.5.2	SALIDA	73
7.2.5.3	SIMETRÍA	73
7.2.5.4	PARED DESLIZANTE	73
7.2.5.5	PARED MÓVIL.....	74
7.2.5.6	PARED NO DESLIZANTE	74
7.2.5.7	PARED ROTATORIA.....	74
7.2.6	<i>CONCEPTOS NUMÉRICOS Y CONTROL DE LA SIMULACIÓN</i>	75
7.2.7	<i>CONTROL DE RESULTADOS</i>	76
7.3	SIMULACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE REFERENCIA	77
7.3.1	<i>PROCESO DE MALLADO</i>	78
7.3.1.1	REFINAMIENTOS.....	79
7.3.1.2	RESULTADOS DE LAS MÉTRICAS DE CALIDAD DE MALLA I.....	80
7.3.2	<i>POST-PROCESAMIENTO I</i>	84
7.4	SIMULACIÓN DE LA GEOMETRÍA MODIFICADA.....	85
7.4.1	<i>RESULTADOS DE LAS MÉTRICAS DE CALIDAD DE MALLA II</i>	86
7.4.2	<i>POST-PROCESAMIENTO II</i>	88
7.5	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	89
7.5.1	<i>FUERZA DE RESISTENCIA AL AVANCE</i>	89
7.5.2	<i>COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL AVANCE</i>	90
7.5.3	<i>FUERZA DE SUSTENTACIÓN NEGATIVA</i>	91
7.5.4	<i>COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN</i>	92
7.5.5	<i>ANÁLISIS DE LOS CAMPOS DE SOLUCIÓN</i>	94
7.6	CONCLUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	97
8	SOLUCIONES CONTEMPLADAS	99
8.1	SOLUCIONES AERODINÁMICAS.....	99
8.2	SOLUCIONES MECÁNICAS	100
9	RESUMEN DE PRESUPUESTO	101
10	ANÁLISIS DE LAS IMPLICACIONES AMBIENTALES I SOCIALES	102
11	CONCLUSIONES FINALES	103
12	REFERÉNCIAS	104

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. RÉGIMENES EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE MACH. (FUENTE [10])	6
TABLA 2. VENTAJAS (VERDE) Y DESVENTAJAS (ROJO) DE LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE OPENFOAM Y SIMSCALE. (FUENTE [12])	68
TABLA 3. COMPARATIVA DE LAS MÉTRICAS DE CALIDAD DE MALLA ENTRE LAS DOS SIMULACIONES	88
TABLA 4. DESGLOSE DEL PRESUPUESTO DEL PROYECTO.....	101
TABLA 5. EMISIONES DE CO ₂ DEL PROVENIENTES DEL CONSUMO ELÉCTRICO DEL ORDENADOR PERSONAL.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LÍNEA DE CORRIENTE. (FUENTE [5])	4
FIGURA 2. FLUJO LAMINAR VS TURBULENTO. (FUENTE [8])	5
FIGURA 3. CAPA LÍMITE. (FUENTE [11])	7
FIGURA 4. EFECTO COANDA EN UNA CUCHARA. (FUENTE [14])	8
FIGURA 5. SEPARACIÓN CAPA LÍMITE. (FUENTE [13])	8
FIGURA 6. ESQUEMA DE FUERZAS AERODINÁMICAS EN PERFIL ALAR. (FUENTE [16])	9
FIGURA 7. RELACIÓN VELOCIDAD Y PRESIÓN EN PRINCIPIO DE BERNOULLI. (FUENTE: LENNTECH)	9
FIGURA 8. FUERZA DE SUSTENTACIÓN EN BASE A LA 3ª LEY DE NEWTON. FUENTE: XATAKA	10
FIGURA 9. ESQUEMA GRÁFICO FUERZA DE ARRASTRE EN PERFIL ALAR. FUENTE SCIENCEFACTS	11
FIGURA 10. DIFERENCIAL DE PRESIONES EN PERFIL ALAR. (FUENTE [21])	12
FIGURA 11. REPRESENTACIÓN ANIMADA DE LA RESISTENCIA AL AVANCE EN UN F1. (FUENTE [22])	13
FIGURA 12. COMPARACIÓN ÁNGULO DE ATAQUE ALERÓN TRASERO DE MERCEDES EN MÓNACO (ARRIBA) Y MONZA (ABAJO). (FUENTE: REDDIT)	13
FIGURA 13. VÓRTICES (LÍNEAS DE CORRIENTE AZUL CLARO/VERDE) EN LA PUNTA DEL ALERÓN TRASERO. (FUENTE: CAESES)	14
FIGURA 14. GENERADORES DE VÓRTICES EN ALERÓN DELANTERO. CÍRCULO ROJO REPRESENTA EL GENERADOR DEL VÓRTICE Y250. (FUENTE: CAR THROTTLE)	15
FIGURA 15. ESQUEMA DE LA TRAYECTORIA DEL FLUJO EN CONTACTO CON LOS GENERADORES DE VÓRTICES. (FUENTE: AERODINÁMICA F1)	15
FIGURA 16. REPRESENTACIÓN ANIMADA DEL FLUJO DE ALTA PRESIÓN FUGÁNDOSE POR LAS RANURAS DEL ENDPLATE EN LOS LATERALES. (FUENTE: CHAIN BEAR)	16
FIGURA 17. EFECTO SUELO. (FUENTE: DINÁMICA 175)	17
FIGURA 18. ÁNGULO DE INCLINACIÓN O RAKE. (FUENTE: TECHNICAL F1 DICTIONARY)	18
FIGURA 19. DIFUSOR DE UN MONOPLAZA DE 2022. (FUENTE: MOTORSPORT)	18
FIGURA 20. BARGEBOARDS QUE DESVÍAN LOS VÓRTICES A PUNTOS CLAVES DE LA CARROCERÍA. (FUENTE: RACEFANS)	19
FIGURA 21. BARGEBOARDS CON FUNCIÓN DE GENERADOR DE VÓRTICES. (FUENTE: RACEFANS)	19
FIGURA 22. FERRARI 1950 CON MOTOR DELANTE. (FUENTE: MOTOR)	20
FIGURA 23. LOTUS 49 CON EL PRIMER ALERÓN DE LA HISTORIA (1968). (FUENTE: CARMODEL)	21
FIGURA 24. PRIMER ALERÓN TRASERO EN LOTUS 49. (FUENTE: MOTORSPORT)	22
FIGURA 25. LOTUS 79 Y EL PRIMER COCHE EN IMPLEMENTAR EL EFECTO SUELO. (FUENTE: MOTORSPORT MAGAZINE)	22
FIGURA 26. CONCEPTO DE DIFUSOR AUTOVENTILADOR DE BRABHAM BT46. (FUENTE: WIKIPEDIA)	23
FIGURA 27. FERRARI 1998. (FUENTE: REDDIT)	24
FIGURA 28. RENAULT 2008 CON MÚLTIPLES APÉNDICES AERODINÁMICOS. (FUENTE: EUROSPOORT)	25
FIGURA 29. RENAULT 2009 TRAS CAMBIO NORMATIVA. (FUENTE: WIKIPEDIA)	26
FIGURA 30. DOBLE DIFUSOR DE BRAWN GP 2009. (FUENTE: CAR THROTTLE)	26
FIGURA 31. REPRESENTACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL F-DUCT DE MCLAREN EN 2011. (FUENTE: AUTO123)	28
FIGURA 32. REPRESENTACIÓN DEL DIFUSOR SOPLADO DE RED BULL EN 2011. (FUENTE: FORMEL 1)	28
FIGURA 33. DRS ABIERTO EN RED BULL. (FUENTE: CAR AND DRIVER)	28
FIGURA 34. REBOTE EN EL HASS EN PLENA RECTA. (FUENTE: FORMULA1)	29
FIGURA 35. VARIACIÓN DE LA CARGA AERODINÁMICA (EJE Y) EN RELACIÓN CON LA VARIACIÓN DE LA ALTURA DE MANEJO (EJE X). (FUENTE [38])	30
FIGURA 36. COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO CON MARSOPEO DESENCADENADO. (FUENTE [38])	31
FIGURA 37. COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO CON MARSOPEO E HISTÉRESIS DE POR MEDIO. (FUENTE [38])	32
FIGURA 38. VARIACIÓN DINÁMICA DE LA CARGA AERODINÁMICA EN FUNCIÓN DE LAS ALTURAS DE MANEJO DELANTERA Y TRASERA. (FUENTE [40])	33
FIGURA 39. (ARRIBA) VARIACIÓN DE ALTURA EJE DELANTERO EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD; (MEDIO) VARIACIÓN DE LA ALTURA DEL EJE TRASERO; (ABAJO) DESPLAZAMIENTO VERTICAL DEL CHASIS. (FUENTE [40])	35
FIGURA 40. (ARRIBA) REBOTE DE LA SUSPENSIÓN DELANTERA; (ABAJO) REBOTE SUSPENSIÓN TRASERA. (FUENTE [40])	36
FIGURA 41. VARIACIÓN DE LA CARGA AERODINÁMICA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD; (ARRIBA) CARGA EN EL EJE DELANTERO; (MEDIO) CARGA EN EL EJE TRASERO; (ABAJO) ACELERACIÓN VERTICAL DEL CHASIS. (FUENTE [40])	36
FIGURA 42. FUERZAS SOPORTADAS EN TRES DIMENSIONES DE LAS SUSPENSIONES. (FUENTE [42])	37
FIGURA 43. SUSPENSIÓN TRASERA DEL MERCEDES W09. (FUENTE [41])	38
FIGURA 44. VARIACIÓN DE LA ALTURA DE MANEJO Y CARGA AERODINÁMICA CON UN TOPE INSTALADO EN EL MUELLE HEAVE. (FUENTE [38])	39

FIGURA 45. SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO CON TOPE DE GOMA AL FINAL DE SU RECORRIDO (NO SE TRATA DE UNA SUSPENSIÓN DE UN F1). (FUENTE: EMD AUTO).....	39
FIGURA 46. MUELLE HEAVE DEL MERCEDES (FLECHA BLANCA). (FUENTE [41]).....	40
FIGURA 47. COMPARATIVA DE LA PÉRDIDA DE CARGA AERODINÁMICA DE UN COCHE PERSEGUIDOR A 20 Y 10 M. ARRIBA COCHE DE 2021; ABAJO COCHE DE 2022. (FUENTE: FORMULA 1).....	41
FIGURA 48. COMPARATIVA ENTRE LA ESPECIFICACIÓN DE ASTON MARTIN EN 2021 (ABAJO) Y LA DE 2022 CON EL CAMBIO DE REGLAMENTO (ARRIBA). (FUENTE: FÓRMULA 1).....	42
FIGURA 49. ELEMENTOS OUTWASHING EN EL ALERÓN DELANTERO DEL MERCEDES DE 2018 (ARRIBA); DIFERENCIAS AERODINÁMICAS EN LA SECCIÓN FRONTAL DEL FERRARI EN 2018 Y 2019 (ABAJO). (FUENTE: MOTORSPORT).....	43
FIGURA 50. NUEVO CONCEPTO DE ALERÓN DELANTERO DE 2022, CON FLECHAS SEÑALANDO LAS CUBIERTAS DE LAS RUEDAS Y LOS NUEVOS ENDPLATES. (FUENTE: MOTORSPORT WEEK)	44
FIGURA 51. DIFERENCIAS EN EL DISEÑO DE LOS BARGEBOARDS DE 2021 Y 2022. (FUENTE: FÓRMULA 1)	45
FIGURA 52. DIFERENCIAS EN EL DISEÑO Y GEOMETRÍA DEL DIFUSOR ENTRE ESPECIFICACIÓN DE 2021 Y 2022. (FUENTE: FORMULA 1).....	46
FIGURA 53. DIFUSOR ESPECIFICACIÓN DE 2022. (FUENTE: MOTORSPORT)	46
FIGURA 54. EL PLANO STEP BAJA HASTA LA ALTURA DEL PLANO DE REFERENCIA (SEÑALADO CON LA FLECHA). (FUENTE: FORMULA 1)	48
FIGURA 55. PANALES LATERALES VERTICALES DEL DIFUSOR A UNA GRAN PROXIMIDAD DEL SUELO. (FUENTE: MOTORSPORT)	49
FIGURA 56. MAQUETA DE ESPECIFICACIÓN DE 2022 SIENDO TESTEADA EN UN TÚNEL DE VIENTO. (FUENTE: SOY MOTOR).....	51
FIGURA 57. RED BULL EXPERIMENTANDO MARSOPEO EN LA RECTA DE BAKÚ. (FUENTE: MOTORSPORT)	53
FIGURA 58. AUMENTO DE LA ALTURA DE MANEJO PARA LOS COCHES DE 2023. (FUENTE: AUTOSPORT)	55
FIGURA 59. TIRANTES EN EL MERCEDES PARA INHIBIR LA FLEXIBILIDAD DEL SUELO ANTE EL REBOTE. (FUENTE: FORMULA 1)	57
FIGURA 60. APÉNDICES GENERADORES DE VÓRTICES EN EL SUELO DEL MCLAREN EN LAS PRUEBAS DE PRETEMPORADA. (FUENTE: TOTAL MOTORSPORT)	57
FIGURA 61. ASTON MARTIN (ARRIBA) CON RADIADORES MÁS ATRASADOS Y ENSANCHAMIENTO FINAL MÁS ABRUPTO; HASS (ABAJO) CON RADIADORES MÁS ADELANTADOS Y CON FORMA DE GOTA AL DISPONER DE MÁS ESPACIO. (FUENTE: FORMULA 1).....	58
FIGURA 62. GRÁFICO DE LA EVOLUCIÓN DE LA ACELERACIÓN VERTICAL DE LAS 10 ESCUDERÍAS EN EL GP AUSTRALIA 2022. (FUENTE: TECH TALK F1)	59
FIGURA 63. DIAGRAMA DE CAJAS REFLEJANDO LOS VALORES DE ACELERACIÓN VERTICAL REGISTRADOS POR TODAS LAS ESCUDERÍAS EN EL GP AUSTRALIA. (FUENTE: TECH TALK F1).....	60
FIGURA 64. GRÁFICO DE LA ACELERACIÓN VERTICAL MÁXIMA REGISTRADA POR CADA EQUIPO EN EL GP ESPAÑA 2022. (FUENTE: TECH TALK F1).....	60
FIGURA 65. GRÁFICO DE LA EVOLUCIÓN DE LA ACELERACIÓN VERTICAL DE LAS 10 ESCUDERÍAS EN EL GP ESPAÑA 2022. (FUENTE: TECH TALK F1).....	61
FIGURA 66. MEJORAS EN EL SUELO DE MERCEDES CON PERFIL INTERIOR LIGERAMENTE MÁS ELEVADO QUE EL EXTERIOR. (FUENTE [51])	61
FIGURA 67. COMPARACIÓN DE LA AMPLITUD Y LA FRECUENCIA DEL REBOTE DE CADA EQUIPO EN LOS TEST DE PRETEMPORADA (FEBRERO) Y EN EL GP ESPAÑA 2022. (FUENTE: TECH TALK F1)	62
FIGURA 68. LEWIS HAMILTON PADECIENDO DOLOR DE ESPALDA AL TÉRMINO DEL GP AZERBAIYÁN 2022. (FUENTE: DAZN NEWS)	65
FIGURA 69. CARLOS SAINZ REALIZANDO ENTRENAMIENTOS DE FORTALECIMIENTO DE LA MUSCULATURA CERVICAL. (FUENTE: FORMULA 1).....	66
FIGURA 70. LOGO DE SIMSCALE. (FUENTE [70])	68
FIGURA 71. MODELO CAD DE MONOPLAZA DE F1 2022 EMPLEADO PARA SIMULAR	69
FIGURA 72. DIMENSIONES DEFINIDAS DE LOS LÍMITES DE LA REGIÓN DE FLUJO.....	70
FIGURA 73. PARÁMETROS GLOBALES DEFINIDOS DE LA SIMULACIÓN.....	72
FIGURA 74. 1-CARA DE VELOCIDAD DE ENTRADA; 2- CARA DE PRESIÓN DE SALIDA; 3- CARA CON CONDICIÓN DE SIMETRÍA; 4- PAREDES CON CONDICIÓN DE DESLIZAMIENTO; 5- PARED MÓVIL.....	75
FIGURA 75. VARIABLES DE CONTROL DE SIMULACIÓN	76
FIGURA 76. CONTROLES NUMÉRICOS DE LA SIMULACIÓN	76
FIGURA 77. DATOS DEFINIDOS PARA EXTRAER LOS COEFICIENTES DE FUERZA Y MOMENTOS DEL SÓLIDO TRAS LA SIMULACIÓN	77
FIGURA 78. PARÁMETROS DE LA MALLA SELECCIONADA	78
FIGURA 79. IZQUIERDA: COORDENADAS DEL REFINAMIENTO DE LA CAJA GRANDE. DERECHA: PARÁMETROS DE REFINAMIENTO DE LA CAJA GRANDE.....	79
FIGURA 80. IZQUIERDA: COORDENADAS DEL REFINAMIENTO DE CUERPO. DERECHA: PARÁMETROS DE REFINAMIENTO DE CUERPO.	79

FIGURA 81. IZQUIERDA: COORDENADAS DEL REFINAMIENTO DEL SUELO. DERECHA: PARÁMETROS DE REFINAMIENTO DEL SUELO.	80
FIGURA 82. ASPECTO GENERAL DEL MALLADO DEL DOMINIO I.	80
FIGURA 83. DETALLE DE LA CALIDAD DEL MALLADO SOBRE LA SUPERFICIE DE LA GEOMETRÍA DE REFERENCIA.	81
FIGURA 84. DETALLE DE LA MALLA REFINADA DENTRO DE LA REGIÓN DE FLUJO I.	81
FIGURA 85. REPRESENTACIÓN DE LA NO-ORTOGONALIDAD RESPECTO AL CENTROIDE DE CELDA Y CARAS DE CELDAS COMPARTIDAS. FUENTE: SIMSCALE [77]	82
FIGURA 86. RESULTADOS DE LAS MÉTRICAS DE CALIDAD DE MALLA I.	83
FIGURA 87. COMPARACIÓN DE OBLICUIDAD ALTA Y BAJO ENTRE DOS ELEMENTOS HEXAÉDRICOS. FUENTE: SIMSCALE [77]	83
FIGURA 88. GRÁFICO DE CONVERGENCIA DE LOS RESIDUOS I.	84
FIGURA 89. ALTURA DE MANEJO CAD GEOMETRÍA DE REFERENCIA (ARRIBA), ALTURA DE MANEJO CAD GEOMETRÍA MODIFICADA (ABAJO).	85
FIGURA 90. ASPECTO GENERAL DEL MALLADO DE DOMINIO II.	86
FIGURA 91. DETALLE DE LA CALIDAD DEL MALLADO SOBRE LA SUPERFICIE DE LA GEOMETRÍA MODIFICADA	86
FIGURA 92. RESULTADOS DE LAS MÉTRICAS DE CALIDAD DE MALLA II.	87
FIGURA 93. GRÁFICO DE CONVERGENCIA DE RESIDUOS II.	88
FIGURA 94. VARIACIÓN TEMPORAL DEL DRAG (N) EN EL COCHE ALTO (ARRIBA) Y EN EL COCHE BAJO (ABAJO).	89
FIGURA 95. VARIACIÓN TEMPORAL DEL COEFICIENTE DE DRAG EN EL COCHE ALTO (ARRIBA) Y EN EL COCHE BAJO (ABAJO).	90
FIGURA 96. VARIACIÓN TEMPORAL DEL DOWNFORCE (N) EN COCHE ALTO (ARRIBA) Y COCHE BAJO (ABAJO).	91
FIGURA 97. VARIACIÓN EN EL TIEMPO DEL COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN EN COCHE ALTO (ARRIBA) Y COCHE BAJO (ABAJO).	93
FIGURA 98. VISTA ISOMÉTRICA COMPARATIVA DE LA DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES SOBRE LA SUPERFICIE DEL COCHE ALTO (IZQUIERDA) Y COCHE BAJO (DERECHA).	94
FIGURA 99. VISTA EN PLANTA COMPARATIVA DE LA DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES EN EL FONDO PLANO DEL COCHE ALTO (ARRIBA) Y COCHE BAJO (ABAJO).	95
FIGURA 100. COMPARATIVA DE MAPAS DE PRESIONES EN SECCIÓN VERTICAL DEL DIFUSOR EN COCHE ALTO (IZQUIERDA) Y COCHE BAJO (ABAJO).	96
FIGURA 101. COMPARATIVA DE CONTORNOS DE VELOCIDAD EN COCHE ALTO (ARRIBA) Y COCHE BAJO (ABAJO).	97

LISTA DE ABREVIATURAS/ GLOSARIO

3r muelle: Más conocido por su término anglosajón, *heave spring*, es el muelle que controla y absorbe la deformación del muelle proveniente de la fuerza *heave* del monoplaza.

Ángulo de ataque: Ángulo de inclinación del perfil alar respecto a su proyección horizontal.

A.O.M: Acceleration Orientative Metric (Métrica orientativa de aceleración).

Apéndice aerodinámico: Dispositivo o componente de geometría diversa con una mera función aerodinámica y que puede ser implementado en cualquier lugar de la carrocería.

Bargeboard: Pieza de carrocería montada verticalmente entre las ruedas delanteras y el inicio de los pontones para ayudar a suavizar el flujo de aire alrededor de los lados del coche.

Beam wing: Literalmente alerón en forma de viga, situado en la parte posterior del monoplaza, entre el alerón trasero y la salida del difusor, que ayuda a optimizar el rendimiento de este último.

CAD: Computer-Aided-Design (Diseño asistido por computadora)

Cake tin: Componente diminuto aerodinámico de fibra de carbono que se encuentra en la parte exterior del sistema de frenos.

Carrocería: Cuerpo o monocasco del monoplaza.

CFD: Computational Fluid Dynamics (Dinámica de fluidos computacional).

Cockpit: Habitáculo en el que va introducido un piloto al conducir.

Courant: Número adimensional que representa el tiempo que una partícula permanece en una celda de la malla.

Damper: Amortiguador.

Downforce: Término anglosajón de carga aerodinámica o fuerza de sustentación negativa.

Drag: Fuerza de resistencia al avance.

Endplate: Paneles verticales que forman los bordes exteriores de los alerones delantero y trasero de un automóvil y a los que se unen los elementos principales del alerón.

F1: Fórmula 1.

Faldillas: Elemento del fondo plano que sella el aire de baja presión debajo del coche.

FIA: Federación Internacional del Automovilismo.

Flap: Elemento articulado o fijo en el borde de salida de un alerón para aumentar la sustentación de un ala.

Footplate: Elemento aerodinámico generador de vórtices insertado en el *endplate*.

GP: Gran Premio.

GP2: Categoría inferior a la Fórmula 1. Actualmente es más conocida como F2.

HANS: Head and Neck Support device (dispositivo de protección de cabeza y cuello).

Heave: Movimiento vertical en ambos sentidos del coche al inducirse más o menos carga aerodinámica, y, por lo tanto, más o menos compresión de las suspensiones del coche.

Inertizador: Elemento amortiguador de aceleraciones.

KERS: Kinetic Energy Recovery System (Sistema de recuperación de energía cinética).



Meshing Log: Lugar en el que se puede visualizar los resultados estadísticos o métricas de calidad de malla de cualquier malla generada.

nonOrthogonality: No-ortogonalidad, tipo de métrica para medir la calidad de una malla.

Outwash: Término anglosajón que indica que la geometría de un elemento aerodinámico es diseñada para desviar la corriente de flujo hacia fuera, es decir, con cierta divergencia.

Paddock: Superficie en un circuito, detrás de la zona de boxes, donde las escuderías aparcan sus camiones e instalan sus casetas.

Plano step: Plano del suelo del coche al mismo nivel de referencia que los bordes exteriores de este.

PIMPLE: Algoritmo híbrido simple-piso ideal para solucionar simulaciones en régimen turbulento.

Porpoising: Término anglosajón del marsopeo.

Pull rod: Geometría específica de suspensión cuyos brazos trabajan a tracción.

Rake: Expresión anglosajona que hace referencia al ángulo que referencia el desnivel del eje trasero respecto al delantero.

Ride height: Término anglosajón de la altura de manejo o conducción, que es la distancia a la cual se encuentra el suelo del eje delantero/trasero del coche respecto al asfalto.

Setup: Reglajes de un monoplace o ajustes a proveerle para encontrar el rendimiento óptimo en función de las condiciones de circuito y estilo de conducción del piloto.

Sidepods: La parte del automóvil que flanquea los lados del monocasco junto al conductor y corre hacia el alerón trasero, además de albergar los radiadores.

Skewness: Tipo de métrica de cuantificación de la calidad de una malla que mide su oblicuidad.

Solver: Código computacional o algoritmo empleado para solucionar ecuaciones numéricamente cuyos valores satisfacen las ecuaciones gubernamentales de la corriente de flujo.

TD 039: Técnica directiva 039.

U.P: Unidad de potencia.

Upwash: Término anglosajón que indica que la geometría de un elemento aerodinámico es diseñada para desviar el flujo de corriente hacia arriba.

VolumeRatio: Tipo de métrica de calidad de una malla que calcula la relación de volúmenes entre celdas adyacentes en la propia malla.

Winglet: Término anglosajón que hace referencia a un ala aerodinámica de menor tamaño y con una geometría muy simplificada.



1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETO

En el presente estudio se busca identificar a nivel teórico la naturaleza mecánica y aerodinámica del efecto marsopa- mejor conocido por su término anglosajón "*porpoising*"- que en 2022 experimentaron los coches de Fórmula 1 tras el revolucionario cambio de reglamentación técnica promulgado por la Federación Internacional de Automovilismo-, para, posteriormente, razonar hipotéticas soluciones que resulten resolutivas y eficaces a nivel mecánico y aerodinámico, mediante simulaciones con *softwares* CFD. Tras esta parte práctica, se busca contrastar los resultados del rendimiento aerodinámico de dos geometrías similares con reglajes diferentes, con tal de determinar si ese cambio de reglajes minimiza en lo máximo este fenómeno, respetando siempre el reglamento técnico de la presente temporada 2022.

1.2 ALCANCE

El presente estudio abordará los siguientes puntos:

- **Marco teórico del efecto suelo**→ Entendimiento del efecto que origina y potencia el marsopeo, profundizando en entender leyes básicas de dinámica y mecánica de fluidos en las que se sustentan la aerodinámica de los coches.
- **Antecedentes de la aerodinámica**→ Se incidirá en las constantes innovaciones y revoluciones aerodinámicas a lo largo de los años en la F1, desde los inicios de la competición hasta la época actual.
- **Estudio de la naturaleza del rebote**→ Análisis de las causas que inducen este fenómeno.
- **Evaluación del reglamento técnico de 2022**→ Entendimiento de la correlación existente entre las nuevas normativas aerodinámicas, mecánicas y de túnel de viento con la aparición del fenómeno.
- **Evolución del efecto rebote en el mundial de F1 de 2022**→ Estudio comparativo mediante gráficos del desarrollo del marsopeo de cada equipo a lo largo de las primeras carreras y cómo lo combatieron, además de cómo fue manejado por la FIA.
- **Simulación con software CFD**→ Se evaluará la diferencia en el rendimiento aerodinámico de un CAD de una especificación de un modelo de F1 de 2022 con diferentes alturas de manejo y comprobar de esta manera cómo de eficiente es la solución.
- **Conclusiones**→ Razonamiento de soluciones investigadas para mitigar el efecto.

- **Presupuesto**→ Coste técnico de redacción del proyecto (honorarios profesionales).

Este documento no incluirá simulaciones prácticas en las que se pretenda recrear el fenómeno y analizarlo por medio de algún *software* especial que simule la cinemática de suspensiones o grado de deflexión de los componentes del coche en respuesta a las fuerzas aerodinámicas. Es decir, en las simulaciones CFD no se considerarán fenómenos transitorios de forma numérica, sino estacionarias. De esta manera, las soluciones aerodinámicas serán razonadas y corroboradas en base a la simulación CFD- además de investigadas-, mientras que las mecánicas serán simplemente investigadas. Por ello, estas medidas no serán razonadas después de investigaciones prácticas a modo iterativo hasta dar con ellas al no disponer de los recursos, conocimientos y herramientas computacionales necesarias para ello. Asimismo, tampoco se diseñará el CAD del F1 empleado para la simulación, sino que será descargado de una librería pública, ya que esa compleja tarea va más allá del alcance de este proyecto.

Por último, hay que aclarar que no se realizará ningún estudio GCI (Grid Convergence) e “y+ Plus” del mallado en las simulaciones de CFD, al no disponerse del tiempo necesario para efectuar dichos estudios. Además, al priorizarse en las simulaciones la búsqueda de resultados relativos entre dos geometrías semblantes antes que resultados absolutos, se decidió prescindir de abordar esos estudios.

1.3 REQUERIMIENTOS

A continuación, se mostrarán el conjunto de especificaciones básicas y restricciones que conforman el desarrollo del proyecto.

- Se tomará en cuenta la normativa técnica y deportiva de 2022 y no la de años anteriores, ya que varían muy significativamente. Asimismo, se estudiará solo el apartado de normas aerodinámicas y aquellos en los que se incida en limitaciones de nivel mecánico y test privados.
- Para realizar una comparativa gráfica y visual mediante *software* CFD de la relevancia de la altura de manejo, se empleará un modelo CAD de una especificación de 2022, el cual será descargado.
- El *software* CFD a utilizar es SimScale, del cual se requieren ciertos conocimientos para realizar exitosamente las simulaciones.
- Se analizará la evolución del marsopeo de las escuderías y sus mejoras implementadas para combatirlo hasta el Gran Premio de Singapur de 2022 (octubre de 2022), aparte de las medidas que fue tomando la Federación Internacional del Automovilismo hasta dicha fecha.
- Se requiere una cierta base de conocimiento de las leyes básicas de mecánica de fluidos, especialmente para comprender los conceptos que se abarcan en el marco teórico del efecto suelo.



1.4 JUSTIFICACIÓN

Hacia tiempo que no se contemplaba en gran escala el efecto suelo en los monoplazas de F1, concretamente desde la última vez que se potenció este en los años 70. Nadie esperaba en sus diseños y simulaciones de túnel de viento que surgiera este efecto rebote tan llamativo, el cual pilló desprevenido a la mayoría de los ingenieros de la parrilla en los test invernales de pretemporada en Barcelona.

Hoy en día constan muchos estudios en los que se evalúa la influencia de algún elemento aerodinámico del coche (alerón delantero, trasero, fondo plano, difusor, halo...) con su respectivo rendimiento aerodinámico, pero la originalidad de este estudio en concreto es la investigación de un fenómeno que deriva de un efecto aerodinámico y del cual se dispone poco conocimiento a fecha actual.

El entendimiento de la naturaleza física y mecánica de este extraño efecto es de gran utilidad, ya que, conociendo el origen de este, los ingenieros pueden llegar a intuir hipotéticas soluciones para mitigarlo y reducirlo. No solo eso, sino que la minimización de este es de suma importancia, ya que puede llegar a ser peligroso para la estabilidad en frenada a altas velocidades del coche, como también para la comodidad y salud física de los pilotos, los cuales experimentan una sucesión de violentos botes dentro de su habitáculo por encima de 300 km/h.

Además, la realización de esta investigación puede ayudar individualmente a desarrollar una mejor comprensión de las leyes universales de dinámica de fluidos, del sistema de suspensiones de un monoplaza de Fórmula 1, e incluso a manejar más competentemente programario CFD con tal de dar con soluciones prácticas a problemáticas reales de fluidos, y con ello, desarrollar mejor el pensamiento ingenieril.

2 FUNDAMENTOS BÁSICOS

A continuación, se describirán los principales conceptos de dinámica de fluidos y aerodinámica de un vehículo de F1 con tal de que el actual proyecto adquiriera una mejor comprensión en base a las siguientes definiciones y leyes universales.

2.1 CONCEPTOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS

2.1.1 CONCEPTO DE FLUIDO

Fluido es aquella sustancia que se deforma continuamente bajo la aplicación de una fuerza tangencial, por muy pequeña que sea. Una de sus características es la capacidad de cambiar de forma sin que surjan en su estructura fuerzas resistivas que busquen recuperar la forma original de este, a diferencia de los sólidos deformables. Se entiende por fluido, los estados de la materia de líquido y gas, siendo este último el que cobrará más importancia en el transcurso del estudio al estudiarse la dinámica del aire en relación a un sólido. [2] [3]

2.1.2 FLUJO ESTACIONARIO Y LÍNEA DE CORRIENTE

El flujo a través de una superficie es la masa de fluido en movimiento que atraviesa una superficie por unidad de tiempo [4]. Dicha masa de fluido en movimiento se encontrará en régimen estacionario si las propiedades físicas de sus partículas (velocidad, presión y temperatura) se encuentran constantes a lo largo del tiempo. Así pues, un flujo no estacionario será aquel cuyas partículas sufran variaciones en sus propiedades físicas en el tiempo.

En mecánica de fluidos, una línea de corriente de las partículas de un fluido en un instante t determinado, es la sucesión de lugares geométricos que ocupan los puntos tangentes al vector velocidad.

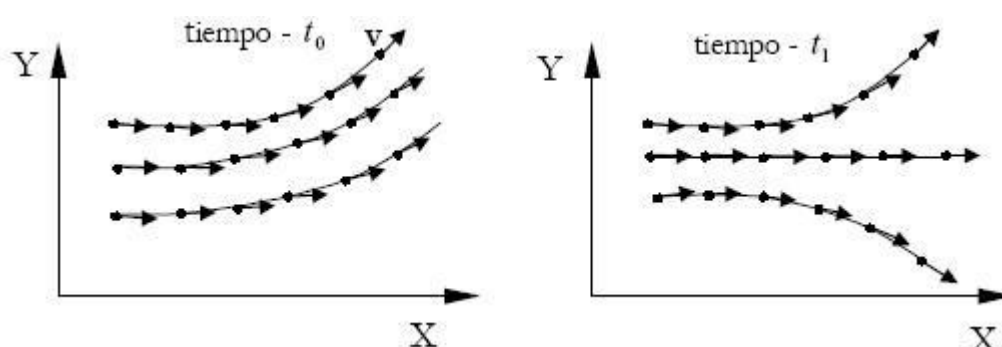


Figura 1. Línea de corriente. (Fuente [5])

2.1.3 FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO

En mecánica de fluidos, el coeficiente adimensional conocido como número de Reynolds, determina el régimen del flujo de un fluido. Este número relaciona las fuerzas inerciales y viscosas de un fluido, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Reynolds = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (1.1)$$

La variable U representa la velocidad del flujo, L la longitud característica que recorre este, y ν la viscosidad cinemática del fluido. El valor de este coeficiente determina si un régimen es laminar o turbulento. Dicha frontera no es constante, ya que depende notablemente de la geometría del sistema en la que se encuentre el flujo, y si se trata de un flujo interno o externo.

- **RÉGIMEN LAMINAR** → Movimiento de un fluido cuando dicho movimiento es ordenado, estructurado y homogeneizado. Las líneas de corriente que siguen las partículas de un fluido son paralelas, sin mezclarse entre ellas, y siguiendo una trayectoria suave. Regresando al número de Reynolds, estos flujos tienen un valor de dicho coeficiente muy bajo, en gran medida porque las fuerzas viscosas predominan mayormente sobre las inerciales. [6]
- **RÉGIMEN TURBULENTO** → Se caracteriza principalmente por el movimiento caótico y muy irregular de las partículas del fluido. Es así, que, el comportamiento de estas suele ser significativamente más impredecible que en las del régimen laminar. Por otro lado, el flujo no fluye en líneas de corriente paralelas, por lo que las capas de este acaban cortándose, experimentando sus partículas sucesivos cambios en la magnitud y en dirección. En este régimen las fuerzas que experimentan las partículas son mayormente inerciales que no viscosas, de ahí valores altos de Re . [7]

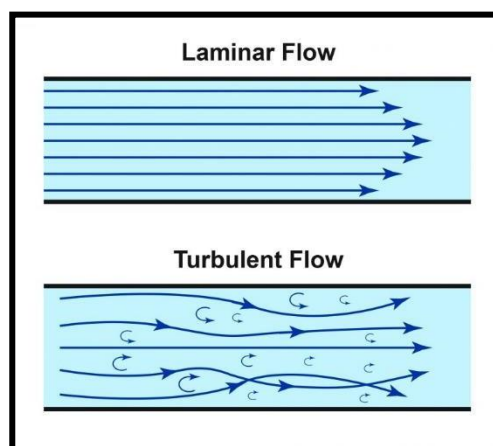


Figura 2. Flujo laminar vs turbulento. (Fuente [8])

2.1.4 COMPRESIBILIDAD DEL FLUJO

Un fluido será considerado incompresible cuando el valor de densidad de este permanezca constante en el tiempo, mientras que, si experimenta variaciones, dicho fluido tendrá ciertos niveles de compresibilidad. Para determinar dicha característica en un fluido se halla el número de Mach (M), también adimensional. Este número representa la relación entre la velocidad de un fluido y el valor de la velocidad del sonido a través de este. [9]

Mediante el número de Mach se puede averiguar a cuántas veces la velocidad del sonido se mueve un fluido sin necesidad de conocer su velocidad. Cuando $M < 0,3$, el aire (que viaja a 340 m/s a temperatura ambiente) se comporta de forma totalmente incompresible. Para estudios aerodinámicos de vehículos terrestres, como el de un F1 para este proyecto, se considera el fluido como incompresible, - un F1 adquiere una velocidad máxima de 95 m/s $\rightarrow M < 0,3$ - lo que simplifica mucho la resolución de las ecuaciones gubernamentales.

En cambio, cuando el número de Mach aumenta por encima de valores de 1, el fluido presenta una notoria compresibilidad al dejar de ser constante su densidad. A continuación, se muestra una amplia distinción de flujos en función del rango en el que M se encuentre:

M	<1.0	0.8–1.2	1.0	1.0–5.0	>5.0
Régimen	Subsónico	Transónico	Sónico	Supersónico	Hipersónico

Tabla 1. Régimenes en función del número de Mach. (Fuente [10])

2.1.5 CAPA LÍMITE

En mecánica de fluidos la capa límite es la zona donde el flujo es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. En dicha región, la velocidad del fluido va decreciendo poco a poco hasta detenerse completamente e incluso alcanzar valores negativos (retrocede). Esto es así ya que cuando las moléculas del fluido golpean la superficie del objeto son frenadas debido a la fricción, y estas a su vez, frenan a las moléculas que se encuentran en capas por encima de ellas, ralentizando así la corriente. Sucesivamente, las capas de moléculas del fluido son frenadas por las capas inmediatamente inferiores, pero al estar cada vez están más lejos de la superficie del sólido, la resistencia es cada vez menor, hasta un punto en el que las moléculas dejan de encontrarse frenadas y asumen la misma velocidad que el flujo de corriente. De esta manera, siempre aparecerá un gradiente de velocidad por las fuerzas de cizalla entre todas las capas de un fluido. [12]

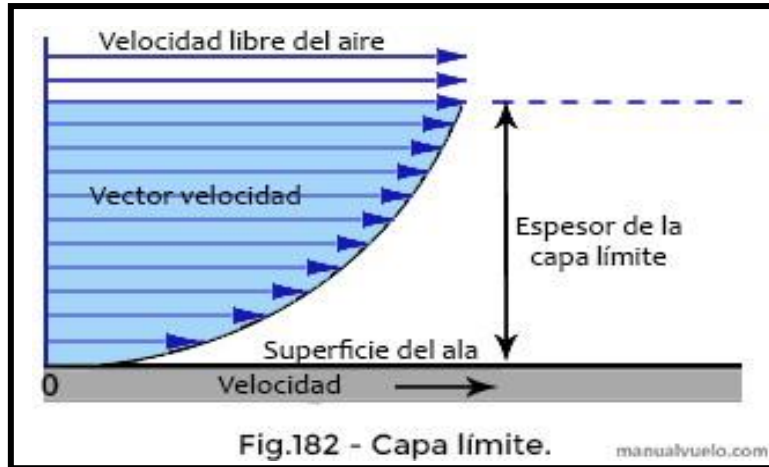


Figura 3. Capa límite. (Fuente [11])

2.1.6 SEPARACIÓN CAPA LÍMITE

La separación de la capa límite se presenta cuando la variación de la velocidad del fluido (magnitud y dirección) es demasiado grande como para que el fluido pueda adherirse a la superficie del sólido. La separación de esta capa límite cuando las líneas de corriente dejan de estar adheridas a la superficie de contacto del sólido se da generalmente por dos motivos:

- **Separación inercial**→ cuando el flujo incide contra una discontinuidad geométrica de la superficie del sólido o un cambio de dirección demasiado abrupto. Cabe recordar que los fluidos experimentan el conocido efecto Coanda, en el cual una corriente de fluido —gaseosa o líquida— tiende a ser atraída por una superficie vecina a su trayectoria [14]. El fluido se adhiere a dicha superficie vecina siempre y cuando la geometría de este lo permita, porque de lo contrario, llega un punto en el que la discontinuidad repentina de la superficie sólida vecina impide que continúe adherido, y por inercia el flujo continúa recto.
- **Gradiente de presión**→ La capa límite experimenta un gradiente de presión adverso cuando las formas del cuerpo se estiran, provocando que el flujo se invierta. Se produce cuando la segunda derivada $dp/ds > 0$ (siendo s la superficie sólida), provocando que la velocidad U disminuya a lo largo de s y que se reduzca a cero o cambie de sentido ($dU/dx < 0$) si el gradiente de presión adverso es lo suficientemente fuerte. [12]

Es importante minimizar este efecto y evitar que se desprenda esta capa ya que cuando esto ocurre, se experimenta una caída repentina de la presión, esto genera estelas y vórtices, y consecuentemente, los vórtices consumen grandes cantidades de energía. Por ello, cuando se produce una separación de la capa límite, el flujo experimenta una pérdida considerable de energía y esa región en concreto entra en régimen turbulento.

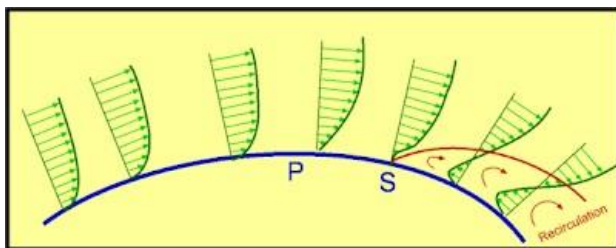


Figura 5. Separación capa límite. (Fuente [13])

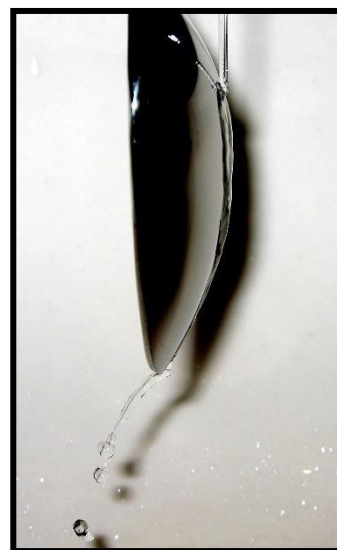


Figura 4. Efecto Coanda en una cuchara. (Fuente [14])

2.1.7 FUERZAS AERODINÁMICAS

La aerodinámica es el campo de la mecánica de fluidos que estudia la interacción y el comportamiento de un fluido (normalmente **aire**) con un cuerpo sólido que se mueve a través de este. Las características físicas y geométricas del sólido, junto a las propiedades del medio por el cual se mueve, dan lugar a una dinámica específica de movimiento [16]. Así pues, estudia los principios y leyes que rigen las interacciones entre el aire y el sólido.

Las principales fuerzas aerodinámicas, que son ejercidas sobre un sólido que se desplaza con cierto movimiento relativo a través de un medio fluido, surgen por las siguientes razones:

- Una fuerza normal perpendicular al movimiento del cuerpo por la presión sobre este.
- Fricción superficial, por la fuerza de cizalla entre el cuerpo y las capas de fluido por las que pasa debido a la viscosidad del medio.

Para comprender mejor las fuerzas que surgen en dicho cuerpo, estas se estudian de forma más visual y esquemática a través de un perfil alar. Un perfil alar es el área transversal de un elemento (generalmente un ala) que a través del aire es capaz de crear alrededor una cierta distribución de presiones [17].

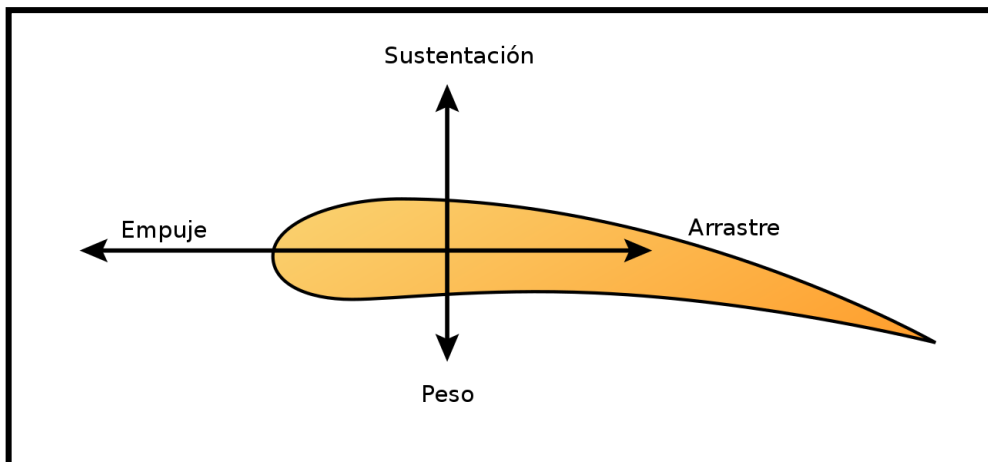


Figura 6. Esquema de fuerzas aerodinámicas en perfil alar. (Fuente [16])

2.1.8 FUERZA DE SUSTENTACIÓN

Es la fuerza perpendicular al flujo de aire relativo generada principalmente por el paso de dicho flujo de aire a través del perfil alar, que es un perfil aerodinámico. Generalmente, la sustentación es perpendicular a la trayectoria o dirección de movimiento del cuerpo. La fuerza de sustentación se sustenta en base a dos principios [19]:

- **Principio de Bernoulli** → Bernoulli describe que el resultado de la presión y velocidad de un fluido ideal a través de un sistema cerrado da un valor constante. Por ello, velocidad y presión deben ser inversamente proporcionales con tal de que la relación permanezca constante. Este principio se puede observar en un tubo de Venturi como muestra la siguiente ilustración:

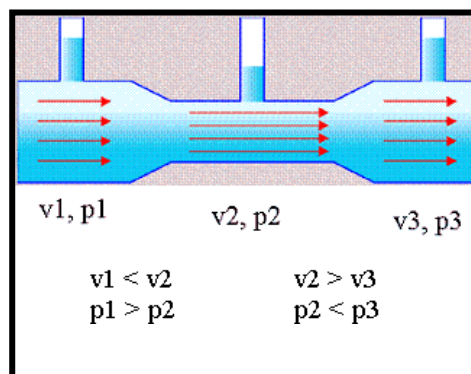


Figura 7. Relación velocidad y presión en Principio de Bernoulli. (Fuente: Lenntech)

La ecuación de Bernoulli entre dos puntos- una apropiación del principio de la conservación de la energía-, es la siguiente relación de la energía de estos por unidad de masa [20]:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} + gz = cte \quad (1.2)$$

Donde el primer término hace referencia a la energía de presión, el segundo a la energía cinética por unidad de volumen y el tercero a la energía potencial por unidad de volumen. No obstante, la citada ecuación presenta algunas limitaciones al ceñirse exclusivamente al flujo estacionario, incompresible, no se tiene en cuenta efectos de fricción (se toma la línea de corriente del núcleo del flujo y no la de una línea de corriente próxima a una superficie sólida), además de no poder haber secciones de flujo con transferencias de calor y en las que intervengan el trabajo de elementos mecánicos [85].

- **Tercera ley de Newton** → “Toda acción tiene una reacción de la misma magnitud y en sentido contrario”. En el ejemplo siguiente, se muestra el caso de un perfil alar en aviación, en el cual el viento relativo que impacta contra su parte inferior se ve obligado a flectar hacia abajo. La reacción sería una fuerza de la misma magnitud, pero en sentido opuesto, generando una fuerza de sustentación positiva.

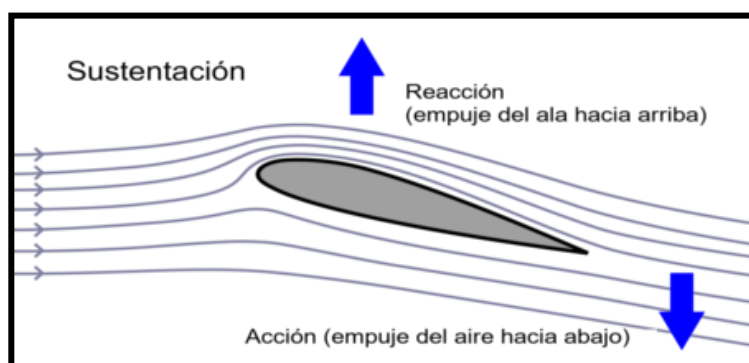


Figura 8. Fuerza de sustentación en base a la 3ª ley de Newton. Fuente: Xataka

El modelo matemático de la fuerza de sustentación (*lift* en inglés) es [18]:

$$F_{sust} = \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot Cl \quad (1.3)$$

Donde U representa la velocidad relativa entre el cuerpo sólido y el fluido, ρ es la densidad del fluido, A es la superficie frontal del cuerpo en la cual incide el fluido y Cl el coeficiente de sustentación. **Así, se observa que, al ser la velocidad un término elevado a su cuadrado, existe una relación importante entre el valor de la fuerza de sustentación y la variación de la velocidad.**

2.1.9 FUERZA DE RESISTENCIA AL AVANCE

Fuerza que experimenta un cuerpo en la dirección de avance y en sentido contrario a este, oponiéndose a su movimiento longitudinal [18]. Es por esto, que, se suele llamar también resistencia aerodinámica al avance y la naturaleza de esta fuerza proviene de:

- Resistencia al avance debido a la **fricción del fluido** contra el sólido, ya que la viscosidad del primero genera fuerzas tangenciales en la superficie del cuerpo.
- Resistencia al avance debido a la **distribución de presiones**. Esto es debido a que al generarse una zona de depresión o vacío en la parte posterior del cuerpo (en los casos en los que la capa límite se desprende al final de la superficie del cuerpo), se genera una diferencia notoria de presiones entre la parte delantera del cuerpo y la trasera. Como las zonas de aire de alta presión buscan siempre desplazarse a las zonas de baja presión, esto genera una fuerza contraria al movimiento longitudinal del cuerpo a través del fluido.
- **Drag inducido** debido a la generación de fuerzas de sustentación.

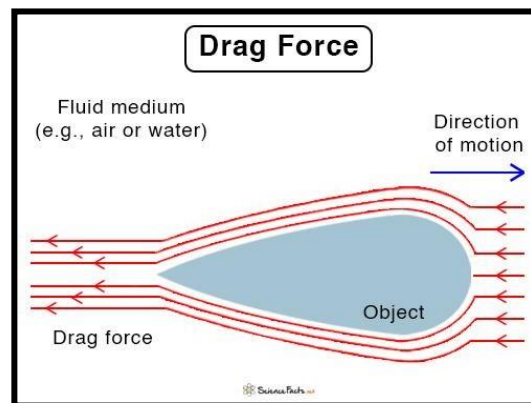


Figura 9. Esquema gráfico fuerza de arrastre en perfil alar. Fuente ScienceFacts.

El modelo matemático de la fuerza de resistencia al avance (*drag* en inglés) es:

$$\text{Drag} = \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot C_d \quad (1.4)$$

Donde U representa la velocidad relativa entre el cuerpo sólido y el fluido, ρ es la densidad del fluido, A es la superficie frontal del cuerpo en la cual incide el fluido y C_d el coeficiente de resistencia al avance. **Así, se observa que, al ser la velocidad un término elevado a su cuadrado, existe una relación importante entre el valor de la fuerza de sustentación y la variación de la velocidad.**

2.2 AERODINÁMICA EN UN FÓRMULA 1

En páginas anteriores se han repasado conceptos fundamentales básicos de mecánica de fluidos que permiten tener un mejor entendimiento de la dinámica de fluidos en un coche de competición como lo es el de un Fórmula 1. Teniendo en cuenta algunos conceptos, leyes y principios mencionados con anterioridad, se aplicará algunos de estos en el análisis del rendimiento aerodinámico de un F1.

2.2.1 FUERZAS AERODINÁMICAS

Un perfil alar, como se ha visto con anterioridad, si no tiene una geometría simétrica provocará que el fluido (el aire en este caso) recorra trayectorias diferentes a velocidad diferentes. Este diferencial de velocidades del flujo dentro del perfil, acorde al principio visto de Bernoulli (ecuación 1.2), inducirá a su vez una diferencia de presiones. El campo de presiones mayor siempre buscará desplazarse al campo de presiones inferior, de ahí la fuerza de sustentación. En un Fórmula 1, queda simplificado según la siguiente ilustración:

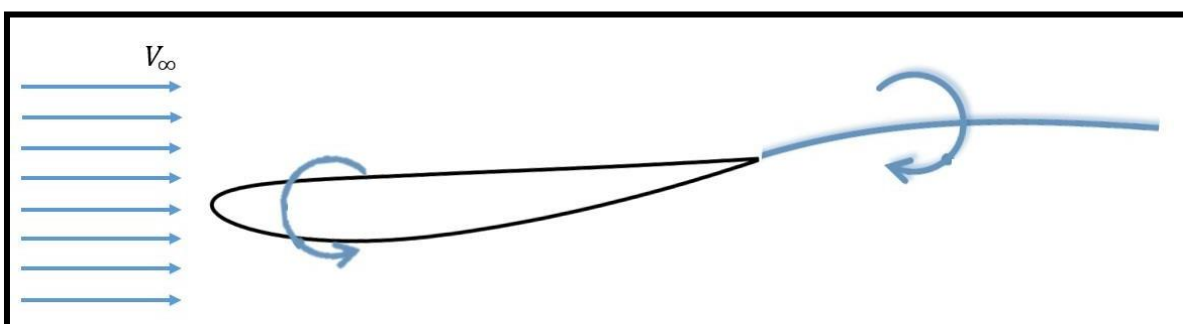


Figura 10. Diferencial de presiones en perfil alar. (Fuente [21])

Bernoulli es una derivación del principio de la conservación de la energía, significando que en un fluido en movimiento al cual ni se le añade ni se le elimina energía, la suma de la presión estática y dinámica (energía cinética en función de la velocidad) siempre debe permanecer constante entre dos puntos cualquiera en una misma línea de corriente. Para mantener esta suma constante, la velocidad y presión en una línea de flujo mantienen una relación inversamente proporcional entre el punto de entrada del perfil alar y la salida. De esta manera, el área de alta presión en la parte superior del perfil con velocidad más baja, al buscar desplazarse al área de menor presión (velocidad más alta), realizará una fuerza vertical negativa contra el ala. Esta fuerza de sustentación negativa es mayormente conocida por su término anglosajón **downforce**, y es la fuerza que comúnmente se denomina carga aerodinámica.

Contra más **downforce** genera un monoplaza de F1, más superficie de neumático estará en contacto contra el asfalto, y por ello, mayor velocidad en paso por curva del vehículo sin que vea comprometida la degradación de los neumáticos debido a la ausencia de deslizamiento.

No obstante, la generación de fuerza de sustentación viene esencialmente de la mano de otra fuerza intrínsecamente vinculada a esta, el **drag** o resistencia al avance. Como se ha visto en el apartado anterior, cuando el flujo de aire a cierta velocidad incide contra un

vehículo, es a la salida de este expedido hacia arriba- dependiendo del ángulo de ataque del ala trasera-, generando un vacío considerable [22]. Es decir, una región de muy baja presión, por lo que esto induce una fuerza en dirección opuesta al movimiento longitudinal del coche. La siguiente ilustración así lo proyecta:

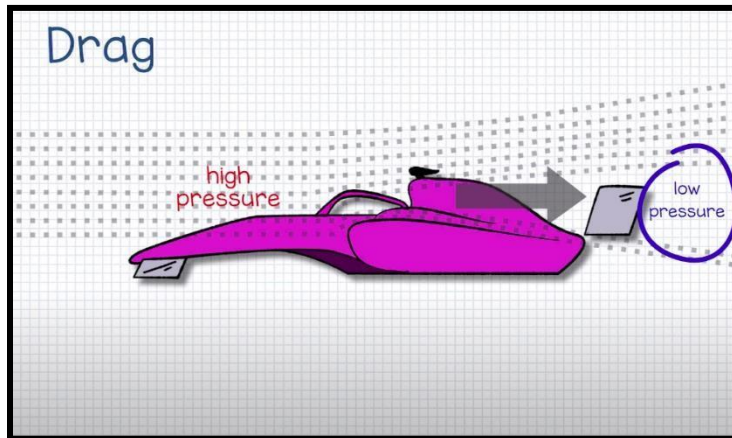


Figura 11. Representación animada de la resistencia al avance en un F1. (Fuente [22])

En definitiva, un desprendimiento de la capa límite del flujo respecto a la superficie sólida, generará zonas de baja presión en régimen turbulento, las cuáles aumentan la resistencia aerodinámica. De esta manera, el vehículo experimenta más oposición para avanzar hacia adelante, viendo comprometida su velocidad punta.

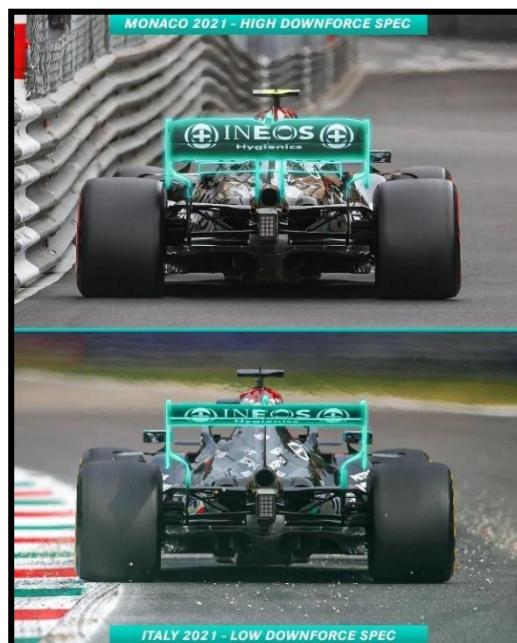


Figura 12. Comparación ángulo de ataque alerón trasero de Mercedes en Mónaco (arriba) y Monza (abajo). (Fuente: Reddit)

Es por ello, que, un exceso de carga aerodinámica conlleva asimismo un exceso de resistencia al avance, algo poco aconsejable en coches de competición. Contrariamente, los

ingenieros buscan un equilibrio eficiente entre ambas fuerzas, ya que un exceso de una de ellas implica pérdida de rendimiento de mano de la otra. Este balance varía de circuito a circuito, donde según las características de este, las configuraciones de puesta a punto del coche varían notablemente. Por ejemplo, Monza, en Italia, es un circuito de muy alta velocidad con muchas rectas y pocas curvas, por lo que conviene sacrificar mucho la carga aerodinámica con tal de sufrir muy poco *drag* y que el coche obtenga una alta velocidad punta. Por otro lado, Montecarlo, es un circuito plagado de curvas de media y baja velocidad en el que interesa tener una velocidad elevada de paso por curva, y no tanto velocidad punta, por lo que es aconsejable sacrificar el *drag* a costa de alta carga aerodinámica.

2.2.2 VÓRTICES

Se ha comentado anteriormente que un perfil alar asimétrico provoca diferencias en las trayectorias del flujo de aire. Dependiendo incluso de cuál sea el ángulo de ataque del perfil, las líneas de corriente nunca se llegan a juntar y a readherir al cuerpo y siguen trayectorias diferentes, creando entremedio una región de vacío de baja presión. En un F1, esto es característico en el perfil alar del ala trasera, en el cual el área de alta presión buscará al área de baja presión, y en ello, generará vórtices en los bordes del alerón.

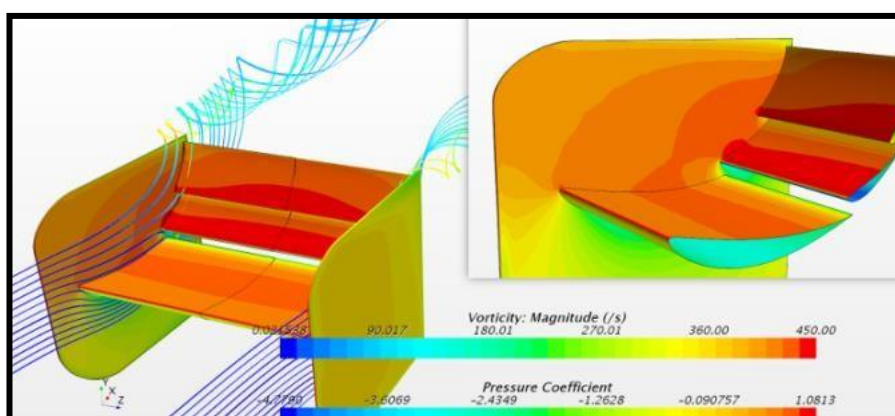


Figura 13. Vórtices (líneas de corriente azul claro/verde) en la punta del alerón trasero. (Fuente: CAESES)

Los ingenieros aerodinamicistas, con tal de incrementar el ángulo de ataque del ala y que el aire de muy alta energía y velocidad siga adherido a la superficie del ala por más recorrido, juegan con la **generación de vórtices**. Un vórtice es un remolino de aire en régimen laminar y en rotación alrededor de un eje con trayectorias de corriente circulares cerradas [22]. Un generador de vórtices es una pieza que al ser atravesada por el flujo induce una diferencia de presiones en este, siendo su función generar un vórtice que manipule las líneas de corriente del flujo de su alrededor.

Por ejemplo, cuándo hay un desprendimiento de la capa límite y se generan vórtices entre medio de los flujos superior e inferior, estos ayudan a juntar de nuevo ambos flujos previamente separados. Ayudan a mantener el flujo de aire pegado a lo largo de todo el mono-plaza, ya que no conviene enviar flujo turbulento y caótico al alerón trasero, sino flujo ordenado y pegado a la superficie en lo máximo de lo posible.

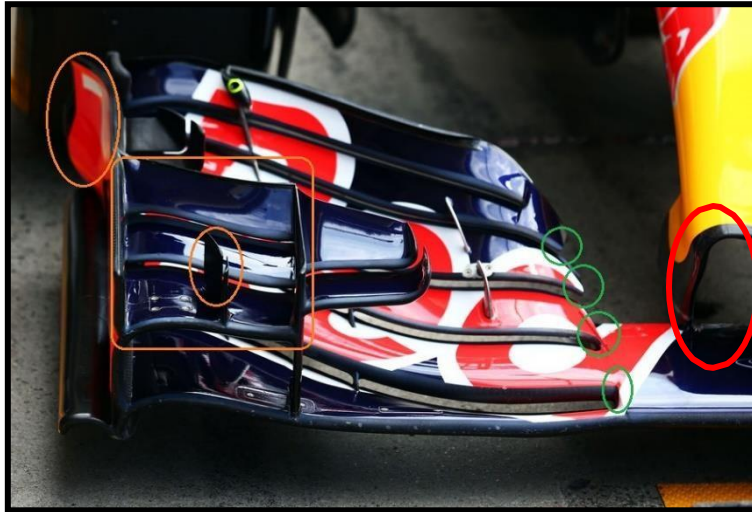


Figura 14. Generadores de vórtices en alerón delantero. Círculo rojo representa el generador del vórtice Y250. (Fuente: Car Throttle)

En la Figura 14, se observa uno de los vórtices más conocidos de un Fórmula 1, el vórtice Y250 generado en el alerón delantero. Es de suma importancia llevar el flujo de aire que entra a través del alerón delantero al fondo plano lo más ordenado, suave y laminar posible. De cara a ese objetivo, se interpone un obstáculo serio y complejo como lo son los neumáticos delanteros, que perturban severamente el flujo inicial que incide en el ala delantera [23]. Los ingenieros, por ello, diseñan unos generadores de vórtices en el ala delantera que desvían el flujo al fondo plano y evitan que choque en gran medida contra los neumáticos.

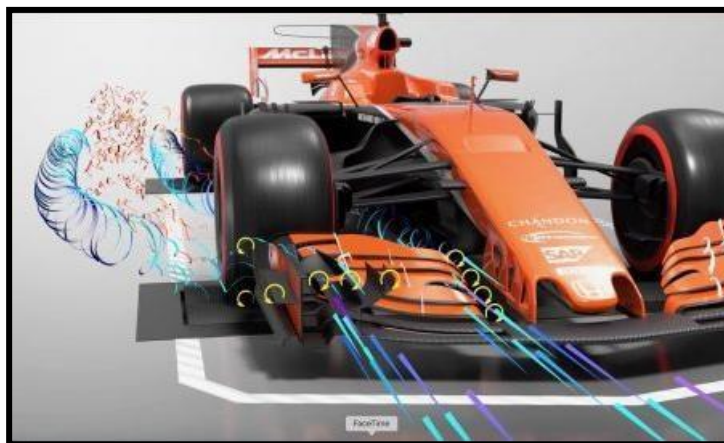


Figura 15. Esquema de la trayectoria del flujo en contacto con los generadores de vórtices. (Fuente: AerodinámicaF1)

2.2.3 ELEMENTOS AERODINÁMICOS DEL ALERÓN TRASERO

Cuando el flujo de aire recorre un monoplaza y sale por el alerón trasero, interesa que el flujo mantenga una velocidad alta a la salida, ya que, de lo contrario, conllevaría más resistencia al avance. No se ha mencionado anteriormente una de las desventajas de los vórtices y es que, al tener trayectoria circular, roban velocidad lineal del flujo vecino y la transforman en velocidad lateral, por lo que más *drag* es inducido. Es por ello, que, en un alerón trasero existen los siguientes elementos para combatir los efectos negativos de los vórtices.

- **Endplate**→ Placa o panel vertical en los costados de un alerón para mantener el flujo de aire ordenado y que produzca *downforce* en la máxima medida de lo posible [24] [26]. En un ala sin estos paneles en los extremos, el aire que circula por la parte superior tiene más presión que el que circula por la parte inferior, por lo que el primero buscará inmediatamente escapar y encontrarse con la región de baja presión. El *endplate* en ambos extremos impide a ese flujo escapar a la parte inferior del ala, por lo que evita la aparición de vórtices perjudiciales, mejorando la eficiencia del ala. Además, en el caso del alerón delantero, permite redireccionar el flujo hacia fuera del coche, evitando que impacte contra los neumáticos.
- **Ranuras en el endplate**→ A pesar de instalar los *endplates*, eso no quita que se acumule mucho flujo de alta presión en la parte superior que busque desesperadamente reengancharse con el flujo de baja presión debajo del ala. Por ello, en el borde final del alerón por el cual sale el flujo, también se generarían potencialmente vórtices considerables que contrarrestasen la eficiencia aerodinámica del conjunto [26]. Es por ello, que en los *endplates* se habilitan unas ranuras que permiten al aire de mayor presión de la parte superior mezclarse muy ligeramente y de manera ordenada con aire a menor presión del exterior. De esta manera, hay una reducción controlada y satisfactoria del diferencial de presión en el perfil alar.

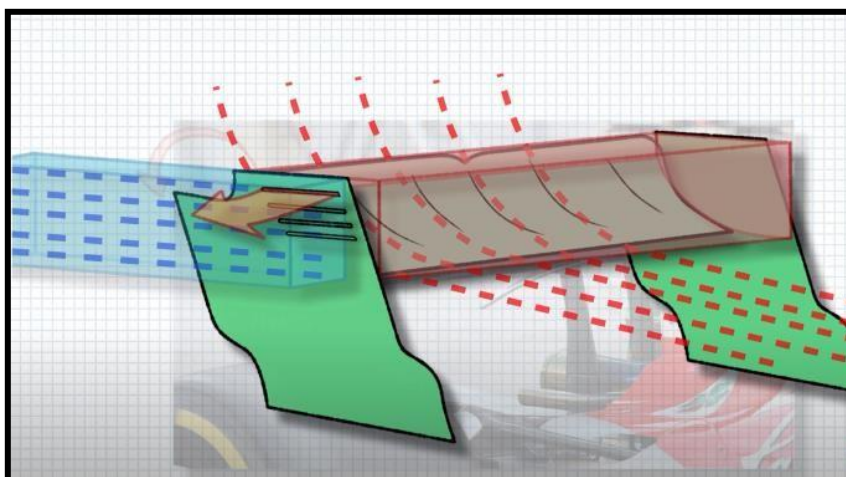


Figura 16. Representación animada del flujo de alta presión fugándose por las ranuras del endplate en los laterales. (Fuente: Chain Bear)

2.2.4 DIFUSOR Y EFECTO SUELO

El difusor es probablemente el elemento de generación de carga aerodinámica más importante de un Fórmula 1. Pese a que los alerones son en su mayoría excelentes dispositivos para crear fuerza de sustentación, por contrapartida, son altos generadores de resistencia al avance. Sin embargo, un difusor genera cantidades importantes de *downforce* (aproximadamente un 40-45% del total generado por el monoplaça) sin apenas afectar negativamente la resistencia al avance del vehículo.

Es un elemento situado en la parte más posterior del monoplaça, no empieza por reglamento antes del eje trasero, se encuentra entre los dos neumáticos bajo el ala trasera y se encuentra por reglamento técnico a una altura mínima respecto al asfalto con tal de minimizar el efecto suelo [25]. La función de un difusor es la de extraer al exterior de manera ordenada y limpia todo el flujo a muy alta energía y elevada velocidad que transcurre por el fondo plano. El caudal de aire que pasa por el fondo plano del coche es en cierta manera comprimido por la escasa distancia al suelo, por lo que el flujo adquiere velocidades muy elevadas, y, en consecuencia, un descenso notorio de la presión. De ahí deriva el conocido **efecto suelo**, en el que a menor distancia respecto al suelo se encuentre el fondo plano, mayor será el efecto “ventosa” del coche contra el asfalto.

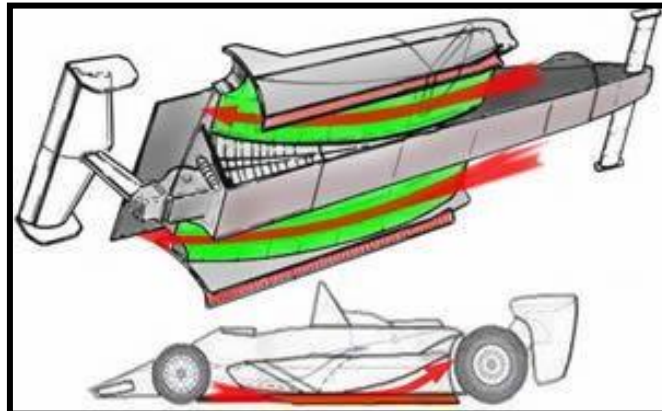


Figura 17. Efecto Suelo. (Fuente: Dinámica 175)

No obstante, si el flujo a muy alta energía sale de forma repentina al exterior, se generarían turbulencias muy perjudiciales para la eficiencia aerodinámica del coche. Por ello, y de manera muy similar a un tubo de Venturi, el difusor tiene un cierto ensanchamiento y altura progresiva respecto al suelo, lo que provoca que el flujo pase a estar menos apretado al recorrer un área con mayor sección que la anterior. En otras palabras, la forma y diseño geométrico del difusor, posibilita que la transición del flujo de muy baja presión debajo del monoplaça a presión ambiente sea lo más suave, estirada y menos caótica posible.

De hecho, para que tal responsabilidad de convertir el aire de muy baja presión a más alta no caiga toda en manos del difusor, los ingenieros suelen elevar el *rake* [26]. Este, en su término anglosajón, es el ángulo de inclinación que tiene el fondo plano de un monoplaça desde el eje delantero a su eje trasero y evita un desprendimiento repentino de la capa límite. Este va a ser un concepto muy importante en este estudio, ya que a mayor *rake*, el flujo transiciona mejor el cambio de presión, pero hay un descenso de la carga aerodinámica.

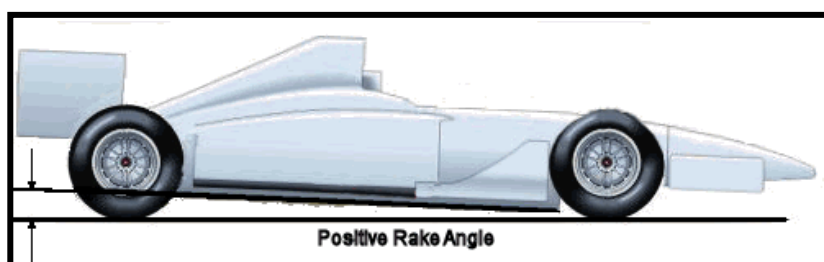


Figura 18. Ángulo de inclinación o rake. (Fuente: Technical F1 Dictionary)

Cabe añadir que gran parte de la eficiencia de un difusor viene dada de la eficiencia proveniente del alerón delantero. El flujo que pasa por el fondo plano proviene del flujo desviado por el alerón delantero, con lo que, si el flujo proveniente de este es desordenado, al difusor llega flujo complejo que reduce notablemente su eficacia. Asimismo, contra más flujo y cantidad de aire pase por el fondo plano, mayor carga aerodinámica potencialmente es generada.

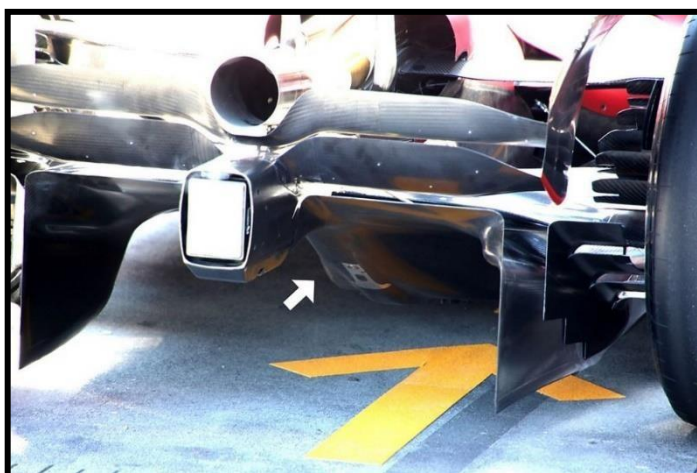


Figura 19. Difusor de un monoplaza de 2022. (Fuente: Motorsport)

2.2.5 BARGEBOARDS

Son contribuyentes aerodinámicos que mejoran la eficiencia aerodinámica del monoplaza y desempeñan diversas funciones. Desvían el flujo y manipulan las líneas de corriente de este para redireccionarlo dónde más interese.

Recordando uno de los vórtices más importantes de un monoplaza de F1, el vórtice Y250, este ayuda a que el flujo limpio y ordenado saliente del alerón delantero no se mezcle con el flujo sucio y turbulento de las ruedas. Actúa de alguna manera como un muro infranqueable de muy alta energía cinética que separa el flujo caótico de las ruedas del flujo suave y liso [26]. Este último es de suma importancia que no se vea perturbado ya que es conveniente redireccionarlo en buenas condiciones al fondo plano, a las entradas de aire

de los radiadores y al resto de la carrocería. Los *bargeboards* ayudan a atraer esos vórtices y llevarlos a lo largo de la carrocería, porque de esta manera el flujo limpio sigue adherido al cuerpo del monoplaza y es redireccionado a puntos clave como se ve en la siguiente ilustración:



Figura 20. Bargeboards que desvían los vórtices a puntos claves de la carrocería. (Fuente: RaceFans)

Por otra parte, hay otros tipos de *bargeboards* que actúan de manera similar a un generador de vórtices y que se encuentran situados a lo largo de la parte superior del fondo plano. Estos crean vórtices que esencialmente sellan el flujo veloz y de muy baja presión debajo del suelo del coche, evitando así que el flujo superior de mayor presión se fugue y se escape debajo del coche.



Figura 21. Bargeboards con función de generador de vórtices. (Fuente: RaceFans)

3 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA AERODINÁMICA DE LOS F1

2022 fue protagonista en el mundo del motor por dar lugar a un revolucionario cambio de normativa aerodinámica. 72 años antes, tuvo lugar el primer campeonato del mundo de Fórmula 1. De ahí en adelante, han transcurrido siete décadas en las que las constantes innovaciones tecnológicas, aerodinámicas y cambios normativos han estado a la vanguardia de todos. A continuación, se va a repasar la evolución de la aerodinámica de los Fórmula 1 desde 1950 hasta la actualidad.

3.1 AÑOS 50

El primer mundial de la categoría reina del automovilismo dio origen en 1950. En esos primeros años no constaban conocimientos aerodinámicos y los avances técnicos no estaban a la vanguardia, por lo que el rendimiento de los monoplazas dependía en gran medida de la potencia del motor. El diseño de los autos era, a pesar de todo, bastante aerodinámico, al ser en gran parte planos y alargados. Es por ese motivo que el flujo incidente en el coche se adhería con mayor facilidad a la superficie de este, con lo que no había un desprendimiento importante de la capa límite, y la estela que dejaban a su paso era laminar. Además, el motor se encontraba, a diferencia de hoy en día, en la parte delantera, por lo que eran coches bastante alargados en el eje delantero. Esto fue en los primeros años, en los que escuderías italianas como Ferrari y Alfa monopolizaban la competición con su motor Ferrari. Fue a finales de esta década, cuando McLaren decidió innovar y probar algo diferente, y lo que hicieron fue desplazar el motor al eje trasero, detrás del piloto, la posición del cual se vio adelantada. [27]



Figura 22. Ferrari 1950 con motor delante. (Fuente: Motor)

3.2 AÑOS 60

Esta década fue testigo del pistoletazo de salida a la carrera por el desarrollo aerodinámico por parte de todos los equipos. Pero fue al final de esta, ya que antes no hubo grandes novedades, más allá de que los monoplazas eran menos voluminosos y estéticos, y que fue introducido en 1962 el primer chasis monocasco de aluminio por parte de Lotus.

Fue en el Gran Premio de Mónaco de 1968, cuando la escudería Lotus y de la mano del pionero del desarrollo aerodinámico en la Fórmula 1, Colin Chapman, presentó en el Lotus 49B los primeros apéndices aerodinámicos de la historia de la competición. Fueron unos pequeños alerones con forma de ala invertida en el alerón delantero, lo que fue el alerón delantero primitivo. [27] [28] El piloto al volante, Graham Hill ganó la carrera y ese fue el punto de partida para todos los ingenieros para el desarrollo aerodinámico de los bólidos, al ver que dichos apéndices otorgaban una significativa succión contra el asfalto a comparación del resto de monoplazas.



Figura 23. Lotus 49 con el primer alerón de la historia (1968). (Fuente: Carmodel)

En las siguientes carreras, todo el mundo comenzó a introducir el mismo concepto de alas invertidas en diferentes partes del coche. La mayoría solían anclar estos alerones en las suspensiones delanteras del vehículo, lo que ocasionalmente provocaba fallas mecánicas.

Sin embargo, Colin Chapman fue otra vez un paso más allá, y desarrolló un nuevo concepto de alerón en su Lotus, el alerón trasero. Por aquel entonces, el alerón trasero primitivo se encontraba excesivamente elevado, lo que generaba que la capa límite al desprenderse produjese una estela demasiado turbulenta y desordenada. En consecuencia, esto generaba dificultades en la conducción de los coches rivales perseguidores produciendo algún que otro accidente aparatoso que conllevó la prohibición de estos apéndices aerodinámicos en el reglamento técnico durante una serie de carreras.

En esa serie de Grandes Premios con la prohibición del concepto de ala trasera introducido por Chapman, los equipos introdujeron un tipo de alerones semblantes a un alerón trasero en la parte delantera. Finalmente, tras esa serie de carreras, la FIA volvió a permitir de nuevo los alerones traseros, pero con unas alturas y dimensiones mínimas reglamentarias.



Figura 24. Primer alerón trasero en Lotus 49. (Fuente: Motorsport)

3.3 AÑOS 70

Entrando en la década de los años 70 y continuando los equipos innovando con alerones delanteros y traseros, Lotus volvió a introducir una novedad que ha perdurado hasta día de hoy. Colocaron las tomas de aire y de refrigeración en los laterales extremos del vehículo, lo que actualmente se conoce como pontones.

Sin embargo, fue 10 años después del primer alerón delantero primitivo, cuando en 1978 Colin Chapman volvió a revolucionar la competición automovilística con otra innovación aerodinámica que pasará a los anales de la historia. Simuló la parte inferior del Lotus como una especie de ala invertida e introdujo faldillas en los laterales del fondo plano, lo que dio origen al descubrimiento del **efecto suelo**. Los ingenieros, gracias a la brillante aportación de Chapman, dedujeron que pegando los monoplazas al asfalto a una escasa distancia de este, se generaba una fuerza vertical negativa o succión sumamente elevada que mejoraba en gran medida la velocidad de paso por curva, y, en consecuencia, el tiempo por vuelta. Además, gracias a las faldillas laterales, el flujo debajo del monoplaza quedaba completamente sellado, imposibilitando que el aire de mayor presión viajase debajo del monoplaza. A esto, hay que añadirle que varios equipos introdujeron los primeros *endplates* a sus respectivos alerones, los cuales incrementaban la eficiencia aerodinámica.



Figura 25. Lotus 79 y el primer coche en implementar el efecto suelo. (Fuente: Motorsport Magazine)

Hay que mencionar que, en el Gran Premio de Suecia de 1978, el equipo Brabham introdujo un concepto de “*autoventilador*”, en la parte trasera del vehículo como contrapeso del efecto suelo. Resultó ser una herramienta efectiva para generar una inmensa cantidad de carga aerodinámica al extraer el flujo de debajo del coche, convirtiéndose en el primer concepto de difusor. Pese a ganar esa carrera, el equipo retiró voluntariamente esta innovación para el resto de carreras [29].



Figura 26. Concepto de difusor autoventilador de Brabham BT46.
(Fuente: Wikipedia)

3.4 AÑOS 80

Pese al gran paso que se dio con el descubrimiento del efecto suelo, la potenciación de este y su efecto lapa provocó innumerables acciones peligrosas. Tantas, que cuando el monoplaza cogía altura por algún obstáculo o irregularidad en el asfalto, este podía llegar a ser catapultado, como ocurrió en el accidente mortal de Jacques Villeneuve. Así pues, en 1981 se prohibió el uso de faldillas y se obligó a las escuderías a incorporar por primera vez fondos planos en la parte inferior del monoplaza en 1983, minimizando de esta manera el efecto suelo.

Por otro lado, en 1981, McLaren introdujo el primer chasis monocasco de fibra de carbono, lo que también fue un cambio que acabó por asentarse hasta la fecha de hoy. Por lo demás, las dimensiones del alerón delantero se vieron de nuevo reducidas y la parte trasera del coche, detrás del habitáculo del piloto, se vio estrechada, en lo que se conoce cómo dimensiones de cuello de botella.

Por otro lado, se emplearon las suspensiones activas que permitían mantener los elementos aerodinámicos a la altura que resultase más ideal. No solo eso, sino que se incorporó por primera vez la barra antivuelco encima del piloto que sustituyó a la toma de aire previa que solía haber.

3.5 AÑOS 90

La última década del siglo XX supuso un freno al carrusel de innovaciones técnicas y aerodinámicas por parte de los ingenieros en busca de la máxima eficiencia y velocidad en pista.

Tras la muerte de Ayrton Senna en 1994, la FIA priorizó la seguridad del piloto, por encima de cualquier tipo de avance tecnológico/aerodinámico que modernizara la competición. Los monoplazas ganaron ligeramente más altura en el tren delantero respecto al suelo, fueron introducidos poco a poco generadores de vórtices por toda la carrocería y también neumáticos acanalados, siendo el objetivo el de reducir la velocidad de paso por curva. Es decir, hacerlos esencialmente más lentos... pero más seguros. Además, el habitáculo o *cockpit* del piloto se vio incrementado en superficie y altura con tal de proteger más la integridad de este y reducir su exposición corporal a siniestros.



Figura 27. Ferrari 1998. (Fuente: Reddit)

3.6 AÑOS 2000

Los primeros años del nuevo milenio transcurrieron sin grandes novedades en cuanto a la aerodinámica se refiere. En 2006, se pasó de motores V10 a motores atmosféricos V8 de 2,4 litros y hubo bastantes limitaciones reglamentarias que no acababan de permitir a los equipos desarrollar la unidad de potencia. Por este motivo, debido a la incapacidad de dar con la tecla ganadora dando con un motor poderoso y potente, los equipos no tenían otra que destacar y ser los mejores de mano de la aerodinámica. Por ello, y al igual que en los 70, los ingenieros aerodinamicistas comenzaron a llenar los monoplazas de apéndices aerodinámicos, culminando esta etapa en 2008, en la que se le conoce como “*el barroco de la aerodinámica*”. Los monoplazas estaban repletos de aletines y generadores de vórtices con tal de producir carga aerodinámica en cualquier región del vehículo. Por contrapartida, el bólido dejaba a su paso una estela muy turbulenta que dificultaba notablemente la persecución y los adelantamientos de los rivales.

Hay que mencionar que en el mismo 2008, la escudería Red Bull de mano de Adrián Newey, introdujo el concepto de lo que hoy en día se conoce como aleta de tiburón. En la parte posterior del monoplaza, esta ala permitía canalizar el flujo de aire mucho mejor y de manera más fluida al alerón trasero, incrementando el *downforce*. Muy pronto, y tras la iniciativa de Red Bull, muchos equipos siguieron los pasos de los austriacos y copiaron el mismo concepto en sus respectivos monoplazas.



Figura 28. Renault 2008 con múltiples apéndices aerodinámicos. (Fuente: Eurosport)

Un año más tarde, en 2009, se produjo uno de los cambios reglamentarios más importantes en la historia del motor. La FIA miró de limitar la dependencia aerodinámica y los vehículos pasaron a disponer un diseño mucho más minimalista. Se redujeron en gran medida la implementación de apéndices aerodinámicos con tal de que estos generasen menos aire sucio y permitieran un mejor espectáculo en pista. El equipo Brawn GP dio con la tecla encontrando el diseño ganador, de la mano de Ross Brawn y de su piloto estrella Jenson Button. Brawn recurrió a una innovadora y brillante forma de generar grandes cantidades de carga aerodinámica sin la necesidad de implementar apéndices aerodinámicos de más. Introdujo el concepto de doble difusor, que despertó mucha controversia en su legalidad y quejas por parte de sus rivales, pero la FIA no sancionó al aprovecharse Brawn de un vacío legal en el reglamento, lo que resultó decisivo para el éxito de escudería y piloto en 2009. Por reglamento, los coches de ese año vieron reducidos su área trasera, y con ello, el difusor, lo que teóricamente comportaba una menor productividad y eficiencia de este. Brawn, viendo un vacío en el reglamento, pensó en el concepto de doble difusor, introduciendo canales en el fondo plano que conectaban con la cubierta superior del difusor. Es decir, no solo se hacía pasar por el difusor el flujo que viajaba debajo del fondo plano, sino también un cierto volumen del flujo que viajaba por encima de este, lo que incrementaba el caudal de aire pasante por este dispositivo y generando mucha más carga aerodinámica de esta manera [31].

Además, se introdujo el KERS, un sistema de recuperación de energía cinética - principalmente en las frenadas- que aportaba potencia extra al motor de los bólidos por un breve lapso de tiempo. La implementación de este sistema fue un quebradero de cabeza para muchos, no solo por su desembolso económico, sino por su gran peso, lo que complicaba la distribución de masas en los vehículos.

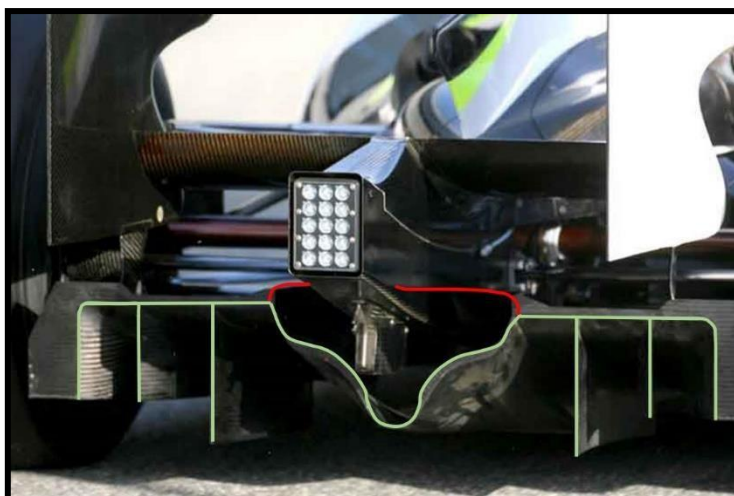


Figura 30. Doble difusor de Brawn GP 2009. (Fuente: Car Throttle)



Figura 29. Renault 2009 tras cambio normativa. (Fuente: Wikipedia)

3.7 ÚLTIMA DÉCADA

Tras las restricciones impuestas a los equipos en su búsqueda de generar carga aerodinámica, estos seguían a inicios de la década de 2010 buscando ese objetivo cumpliendo con el minimalismo aerodinámico presente en la reglamentación. El concepto de doble difusor fue poco a poco implementado en el resto de los equipos, pero fue prohibido en 2011. Algunas novedades aerodinámicas de la primera mitad de década fueron [30]:

- **Conducto F** → Implementado por McLaren en 2010. Mecanismo que consistía en una toma pequeña de aire en la carrocería, delante del piloto. Esta toma de aire canalizaba el flujo y lo llevaba hasta el interior del *cockpit* del piloto, donde en este la tubería presentaba un agujero en el lado izquierdo del piloto [32]. Si el agujero

quedaba descubierto, el aire iba al *cockpit*; pero si era tapado voluntariamente por la pierna izquierda del piloto, el aire continuaba por la tubería. Por otro lado, hay que recordar que encima del piloto se encuentra la admisión de aire, la cual constaba en el McLaren de dos tomas en una. La inferior servía para aspirar aire para alimentar el motor y la superior para refrigerar la caja de cambios. Si el agujero mencionado anteriormente era tapado, el aire iba directo por el interior del coche al conducto por donde circulaba el aire de la toma de admisión superior y ambos flujos eran desviados a un conducto nuevo en la parte superior trasera de la aleta de tiburón. Cuando este flujo recorría este nuevo canal, salía expulsado directo hacia el alerón trasero a alta velocidad, produciéndose un desprendimiento de la capa límite, perdiendo así *downforce* y ganando, con ello, velocidad punta. En rectas, el piloto tapaba el agujero para ganar velocidad, y en el resto del circuito mantenía el agujero descubierto permitiendo el funcionamiento normal de las tomas de admisión. Este mecanismo fue prohibido en 2011, pero fue sustituido por otro mecanismo, a la postre más resolutivo y efectivo para ganar velocidad punta.

- **DRS**→ El conocido DRS, o sistema de reducción de *drag*, fue introducido por la FIA en 2011 con tal de facilitar los adelantamientos reduciendo considerablemente el *drag* de los monoplazas en recta. Es un alerón ajustable que consiste en un *flap* o solapa móvil ubicado en el alerón trasero, la cual cuando se abre manualmente por solicitud del piloto, es completamente horizontal y el monoplaza sufre una pérdida notoria de carga aerodinámica y un aumento de entre 12 y 15 km/h en velocidad punta en recta, facilitando los adelantamientos [35]. El *flap* móvil solo puede moverse verticalmente un máximo de 85 mm en relación con el ala fija.
- **Difusor soplado**→ Sistema implementado por Red Bull ante la prohibición de los dobles difusores, que aprovecha el flujo de los gases de escape para alimentar el difusor y ganar así más carga aerodinámica. Este mecanismo miró de mover la salida del tubo de escape a una zona en la cual se pudiese dirigir los gases al difusor, maximizando la función de este último [33]. A mayores revoluciones del motor, más gases expulsaba el tubo de escape y mayor flujo pasaba por el difusor. No conforme con eso, Newey ideó un sistema mediante el cual los tubos de escape continuarán emitiendo gases en curvas lentas cuando el piloto no tenía el pie en el acelerador y no producía potencia.
- **Halo**→ Tras el fallecimiento de Jules Bianchi por un grave accidente en el Gran Premio de Japón de 2014, la FIA obligó a los equipos en 2018 a implementar el *halo*, un sistema de seguridad que protege la cabeza del piloto [34]. Consiste en tres barras flexibles de titanio de 10 kg, una delante del piloto y dos encima de este, que le protege mayormente de golpes externos u objetos que puedan impactar contra él.

En 2017 se produjo un cambio de reglamentación aerodinámica, el cual buscaba de nuevo que los monoplazas fuesen veloces y generasen mucha carga aerodinámica. El tamaño de los neumáticos fue incrementado notoriamente, así como las dimensiones del alerón y suspensiones delanteras. El fondo plano se vio ligeramente alargado y se implementaron complejos y altos *bargeboards* que ayudaron a reducir las turbulencias generadas por los neumáticos de mayor tamaño. En definitiva, hubo un aumento notorio dimensionalmente todas las dimensiones del monoplaza, siendo muy rápidos por curva, pero generando mucho aire sucio.



Figura 33. DRS abierto en Red Bull. (Fuente: Car and driver)



Figura 32. Representación del difusor soplado de Red Bull en 2011. (Fuente: Formel 1)



Figura 31. Representación del funcionamiento del F-Duct de McLaren en 2011. (Fuente: auto123)

4 MARSOPEO Y SUS CAUSAS

Una vez presentados y estudiados algunos conceptos teóricos básicos de la mecánica de fluidos, y tras hacer un poco de hincapié en la aerodinámica que atañe a un monoplaza de Fórmula 1 y su efecto suelo generado, en la siguiente parte del proyecto se procederá a analizar el fenómeno que tiene como principal enfoque esta memoria.

Cómo se ha explicado anteriormente en el capítulo de la evolución histórica de la aerodinámica, a finales de la década de los 70, los monoplazas eran diseñados de tal forma que el suelo del coche tenía forma de ala invertida. De esta manera, la succión que generaba sumado a las faldillas selladoras que eran implementadas acabarían originando el descubrimiento del efecto suelo. El Lotus del año 1979, pilotado por Mario Andretti, comenzó a dar algunos síntomas del marsopeo, pero no a una escala similar a la actual [36]. Por lo tanto, ya 40 años atrás se evidenció este problema para los vehículos, pero no fue a más, debido a la rápida prohibición posterior del efecto suelo por parte del máximo organismo gubernamental del automovilismo.

El marsopeo, en términos generales, es una **oscilación aerodinámica inducida** originada por un colapso del efecto suelo [37]. Los monoplazas de Fórmula 1 de 2022, por reglamento, estaban mucho más cerca del suelo y apenas tenían *rake* en comparación con otros años, lo que incrementaba la succión contra el asfalto. Cómo se ha matizado anteriormente, el valor de la carga aerodinámica mantiene una fuerte relación con la velocidad relativa del fluido.

De esta manera, cuando el monoplaza está en una recta suficientemente larga, a más velocidad, más flujo de aire pasa por debajo de este, y con ello, más succión y adhesión contra el asfalto. Paralelamente, a más succión, la distancia entre el fondo plano y el asfalto decrece, más estrechamiento se origina por donde pasa el flujo, y recordando a Bernoulli (ecuación 1.2), la presión cae a valores cada vez más bajos. Llega un momento, pues, en el que el fondo plano baja hasta una altura mínima respecto al suelo en la que se produce su pico de carga aerodinámica. El problema viene cuando el fondo sigue bajando más allá de esa altura óptima ideal, ya que el canal por el cual el flujo transcurre es tan estrecho e incluso nulo, que dicho flujo no puede pasar y se produce un colapso del efecto suelo y se rompe el flujo pasante. En otras palabras, más allá de ese punto óptimo desaparece la enorme succión previa y el coche, de un momento a otro, pierde súbitamente una gran cantidad de carga aerodinámica [37].



Figura 34. Rebote en el Hass en plena recta. (Fuente: Formula1)

Así pues, el vehículo tras perder mucha succión repentinamente se dispara hacia arriba ganando varios milímetros de altura de golpe. Llegados a este punto, sigue pasando flujo de aire a muy alta velocidad, con lo que el coche- como en sus inicios- vuelve de nuevo a generar carga aerodinámica desde el principio. El fondo plano se vuelve a comprimir a medida que la succión crece, hasta que el decaimiento de altura vuelve a ir más allá de ese punto óptimo, se produce el colapso del efecto suelo, el monoplaza se dispara hacia arriba perdiendo toda la carga aerodinámica anterior y el proceso vuelve a comenzar. De esta manera, este último continúa cíclicamente- de manera similar a un movimiento oscilatorio con su respectiva amplitud y frecuencia -, hasta que el monoplaza frena a final de recta y el fenómeno desaparece.

Hay varias razones por las cuales este efecto rebote es inducido, y a continuación, se procederá a analizar su vertiente aerodinámica y mecánica, con tal de lograr una mayor comprensión de la esencia de este.

4.1 NATURALEZA AERODINÁMICA

El marsopeo es una **oscilación inducida principalmente por el efecto suelo**. El ciclo del rebote que se ha comentado con anterioridad tendría simplifícadamente la siguiente representación en forma de esbozo con una mera función representativa. Se relaciona la carga aerodinámica con el *ride height* del monoplaza, o altura de manejo:

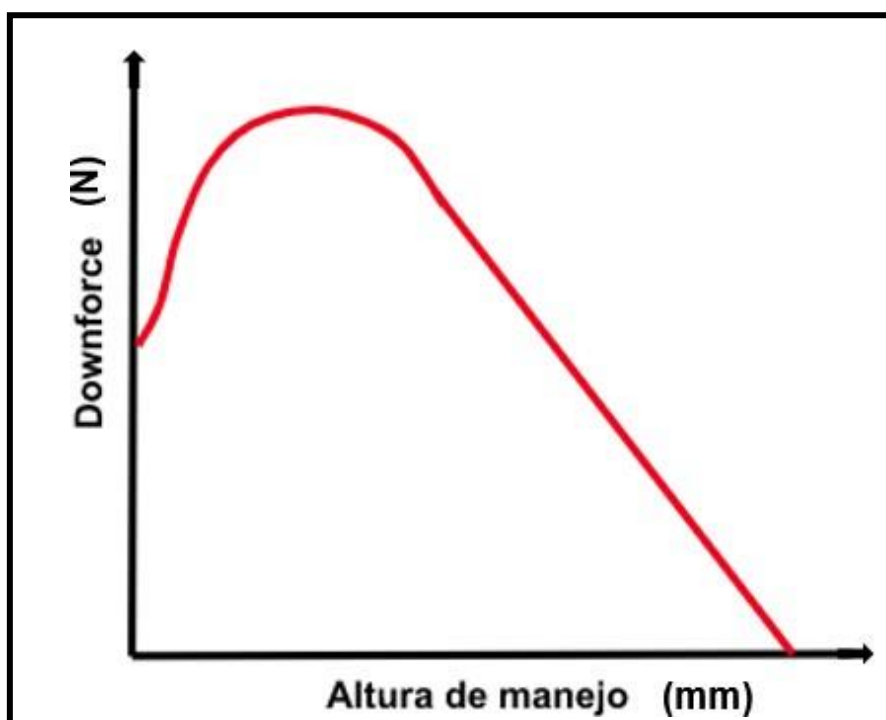


Figura 35. Variación de la carga aerodinámica (eje y) en relación con la variación de la altura de manejo (eje x). (Fuente [38])

Cómo se observa, la carga aerodinámica depende en gran medida de la altura de manejo del monoplaza. A menos altura, más succión, produciéndose un pico o región en la que el coche rinde de manera óptima. Más allá de ese punto óptimo, se produce un decaimiento repentino de la carga aerodinámica.

Cabe destacar, que, dependiendo de la geometría del ala delantera y del fondo plano, se originan diferentes niveles de carga aerodinámica a medida que el coche se acerca al suelo [38]. Es decir, una cierta geometría genera más o menos fuerza de sustentación, creando diferentes respuestas a la estabilidad del vehículo en función de la altura de manejo en la que se encuentre. Si al esbozo anterior se le añade el efecto del marsopeo, queda representado muy simplídicamente de la siguiente manera:

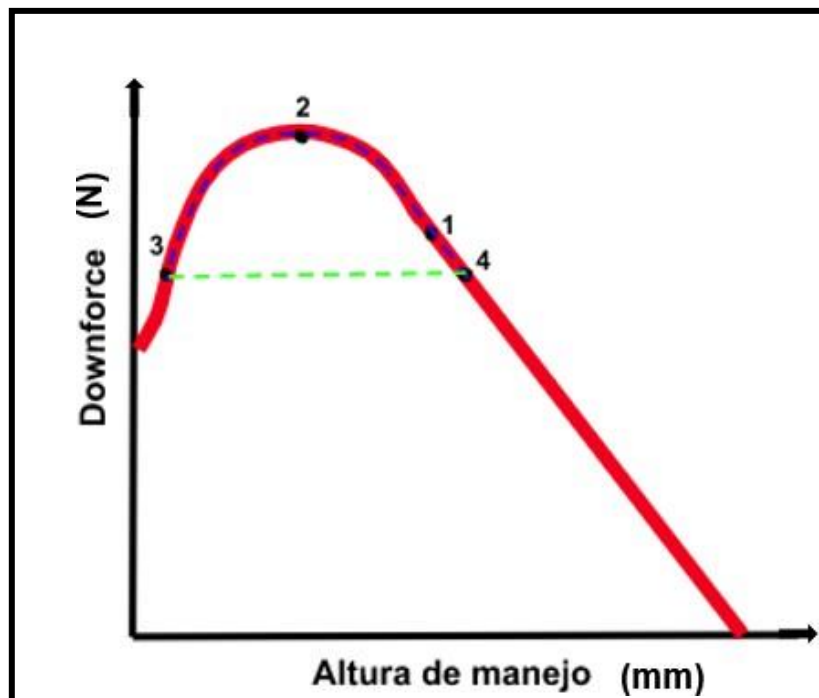


Figura 36. Comportamiento aerodinámico con marsopeo desencadenado. (Fuente [38])

La línea de trazos azul corresponde a la fase de bote (o compresión del monoplaza) y la línea de trazos verde corresponde a la fase de rebote o expansión vertical. Del punto 1 al 2, la velocidad del flujo aumenta en la parte inferior del automóvil y la altura de este decae en consecuencia, hasta el punto 2 en el que se adquiere la carga aerodinámica máxima a una cierta altura de manejo. Pasados ese punto, se produce un colapso aerodinámico del efecto suelo una vez la altura es casi 0, y se produce una caída importante del *downforce* en el punto 3. Lo que mantenía comprimido al coche contra el asfalto era la propia carga aerodinámica, y ante la repentina ausencia de esta, del punto 3 al 4, el coche se levanta súbitamente y regresa a la altura de manejo del punto 1. De esta manera, se completa un ciclo de la oscilación y este vuelve a comenzar de nuevo de manera indefinida hasta que la velocidad de flujo baje sustancialmente tras una frenada.

No obstante, cabe resaltar que la aerodinámica del monoplaça en esa representación sufre, lo que es llamado, un proceso de **histéresis**. Esto significa que la aerodinámica del monoplaça no es la misma cuando el vehículo se comprime que cuando se expande. Recordar que la histéresis es la tendencia que tiene un material de conservar una de sus propiedades en ausencia del estímulo que la ha provocado [39]. Simplificadamente y aplicando este fenómeno al último gráfico ya presentado, quedaría la siguiente representación:

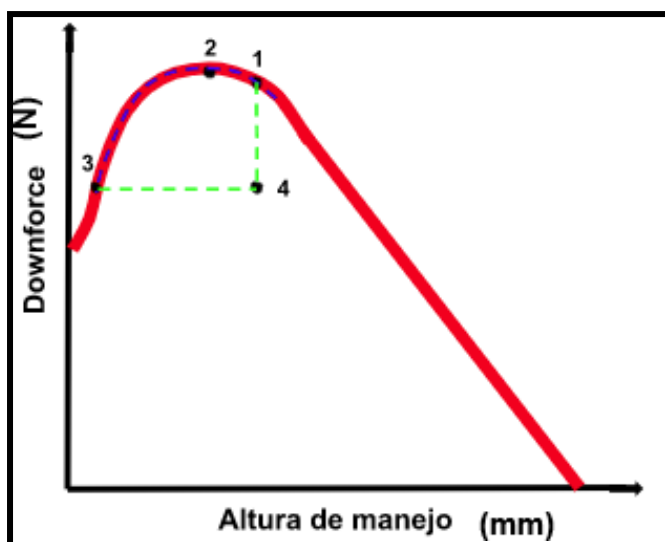


Figura 37. Comportamiento aerodinámico con marsopeo e histéresis de por medio. (Fuente [38])

Las tres primeras fases son las mismas que en el gráfico anterior y representa el mismo comportamiento aerodinámico del monoplaça, pero la diferencia es que, en condiciones reales y no teóricas, aparece un principio de histéresis. Relacionando este caso con la definición del fenómeno antes otorgada, cuando el coche es liberado hacia arriba, gana altura hasta una en la que el monoplaça de alguna manera recupera de golpe un valor de carga aerodinámica memorizado o que conserva. Por eso, en la altura de manejo del *punto 4*, el coche deja de ganar altura y recupera súbitamente el *downforce* memorizado del *punto 1* a la mínima que el flujo de la parte inferior del coche vuelve a readherirse y a pasar por debajo de este.

Llegados a este punto, se puede llegar a la conclusión de que el *downforce* es extremadamente sensible a la variación de altura de manejo, ya que una variación milimétrica de este último valor a una velocidad medianamente elevada induce una diferencia significativa de carga aerodinámica generada. Así pues, en este caso, se puede llegar a experimentar marsopeo por una **característica aerodinámica no deseada** [38].

En un artículo de este mismo año 2022, publicado por Marco Gadola, Daniel Chindamo, Paolo Magri y Giulia Sandrini [40]- todos de la Universidad de Brescia, Italia- se publicó un estudio realizado de CFD de un prototipo de GP2, monoplaça conceptualmente hablando muy similar a un F1. Los resultados de post-procesamiento muestran unos mapas aerodinámicos reflejados en unas tablas de consulta que describen las propiedades funcionales del prototipo en relación con su rendimiento aerodinámico. Estas tablas de consulta analizan valores de los productos $C_D S$ (*coeficiente de drag*), $C_Z S$ (*coeficiente de sustentación*) y A_B (*balance aerodinámico*) como función de la combinación de diferentes *Front Ride*

Height y Rear Ride Height - es decir, altura de manejo delantera y trasera respectivamente [40].

Cz*S		RRH [mm]											
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
FRH [mm]	0	92.2%	95.5%	97.8%	99.2%	99.9%	100.0%	99.7%	99.0%	98.1%	97.1%	96.2%	95.4%
	2.5	91.2%	94.4%	96.7%	98.1%	98.8%	98.9%	98.5%	97.8%	96.8%	95.8%	94.7%	93.9%
	5	89.9%	93.3%	95.6%	97.0%	97.7%	97.8%	97.3%	96.5%	95.5%	94.4%	93.3%	92.3%
	7.5	88.6%	91.9%	94.3%	95.8%	96.5%	96.5%	96.1%	95.3%	94.2%	93.0%	91.8%	90.8%
	10	87.1%	90.5%	92.9%	94.4%	95.2%	95.3%	94.8%	94.0%	92.9%	91.7%	90.4%	89.3%
	12.5	85.5%	89.0%	91.5%	93.1%	93.9%	94.0%	93.6%	92.7%	91.6%	90.4%	89.1%	87.9%
	15	83.8%	87.4%	90.0%	91.7%	92.5%	92.7%	92.3%	91.5%	90.4%	89.1%	87.8%	86.6%
	17.5	82.0%	85.8%	88.5%	90.3%	91.2%	91.4%	91.1%	90.3%	89.2%	88.0%	86.7%	85.4%
	20	80.3%	84.2%	87.0%	88.9%	89.9%	90.2%	89.9%	89.2%	88.2%	87.0%	85.6%	84.4%
	22.5	78.5%	82.6%	85.5%	87.5%	88.6%	89.1%	88.9%	88.2%	87.2%	86.0%	84.8%	83.5%
	25	76.7%	80.9%	84.1%	86.2%	87.5%	88.0%	87.9%	87.4%	86.4%	85.3%	84.1%	82.8%

Figura 38. Variación dinámica de la carga aerodinámica en función de las alturas de manejo delantera y trasera. (Fuente [40])

La Figura 38, una tabla de consulta extraída del mencionado artículo, muestra el porcentaje de carga aerodinámica respecto a la máxima del prototipo analizado en relación a la altura de eje delantero y trasero. De esta manera, y como se ha señalado anteriormente, milímetro arriba, milímetro abajo puede afectar de manera visible y clara el rendimiento aerodinámico del coche. En lo que atañe a la combinación óptima, se puede ver que la altura de eje delantero induce más carga cuando está aproximadamente a 5 mm del suelo, o menos. Sin embargo, se observa que contra más *rake* o diferencia de altura entre ejes, más carga aerodinámica (siendo 30 mm de altura de eje trasero la altura trasera ideal), pero hasta un punto en que, por encima de este, vuelven a haber pérdidas, principalmente porque contra más agresivo sea este ángulo de inclinación, más probabilidades hay de que haya desprendimiento de la capa límite. Por eso, los equipos necesitan dar con el *setup* ideal, en el que den con una altura de manejo óptima que no induzca *marsopeo*, pero al mismo tiempo que no comprometa el rendimiento aerodinámico del monoplaza, ya que los tres parámetros anteriores ($C_D S$, $C_z S$ y A_B) que definen el rendimiento de un monoplaza representan una marcada función no-lineal de la variación de alturas de manejo. Es decir [40]:

$$X = F_d, F_z, A_b = f(FRH, RRH) \quad (3.1)$$

En el mismo artículo mencionado de la Universidad de Brescia se intentó recrear el fenómeno del *marsopeo* en el mismo prototipo de GP2. Dicho vehículo fue modelado y simulado en un conocido simulador de conducción de entorno abierto, *VI-Grade environment*. En este *software* se aplicó las no-linealidades de los mapas aerodinámicos previos, cinemática de las suspensiones y propiedades radiales y de carga en los neumáticos. Este modelo de GP2 se ideó tomando como referencia un modelo de vehículo cuasi-estático de 4 grados de libertad desarrollado y validado tras cuatro años de actividad ingenieril en pista, y todo a través de la comparación de datos adquiridos en pista y de *feedback* de pilotos profesionales. Tras una primera simulación, se obtuvo unos primeros resultados llamados *#SetUp1* [40], cuyos gráficos reflejan una notoria sensibilidad no-lineal tanto de la altura de manejo delantera como de la trasera. Es decir, en función de la variación milimétrica de alturas a la que se encuentran ambos ejes, se presenta unos niveles de carga aerodinámica distintos en respuesta a un incremento de velocidad.

Tomando las ecuaciones siguientes extraídas del artículo, para hallar el nivel de carga aerodinámica que es capaz de experimentar el tren delantero del vehículo [40]:

$$F_{Z_{front}} = F_Z \cdot A_b \quad (3.2)$$

Siendo F_Z el valor de fuerza de sustentación (ver ecuación 1.3) y A_b el balance aerodinámico, que es la distribución delantera y trasera del *downforce* representado en porcentaje del eje delantero. Mientras que para el tren trasero:

$$F_{Z_{rear}} = F_Z \cdot (1 - A_b) \quad (3.3)$$

Así pues, tras esta primera simulación, diferentes tipos de funciones decadentes exponenciales arbitrarias fueron implementadas a los mapas aerodinámicos iniciales del #Setup1 con tal de reproducir la dinámica de rebote propia del marsopeo. De este modo, las ecuaciones anteriores que reflejan el valor de *downforce* delantero y trasero, se ven modificadas por un término exponencial.

$$F_{zfrt_{porp}} = F_{zfrt} \cdot \left(\frac{FRH}{FRH_s} \right)^{\frac{1}{d}} \quad (3.4)$$

Donde F_{zfrt} es el valor teórico de *downforce* delantero (ecuación 3.2); FRH es la altura de manejo delantera a una velocidad instantánea; FRH_s es la altura de manejo delantera estática que posee el monoplaza en estático; y d es la distancia que hay entre la cabeza del muelle *heave* (3r muelle) de la suspensión y el tope de goma. Lo mismo para el eje trasero:

$$F_{zrr_{porp}} = F_{zrr} \cdot \left(\frac{RRH}{RRH_s} \right)^{\frac{1}{d}} \quad (3.5)$$

Como se observa en estas funciones decadentes exponenciales, los valores de carga delantera y trasera dependen respectivamente del valor instantáneo de FRH y RRH . Así pues, estas funciones reflejan de manera concisa que, si la diferencia de alturas estática e instantánea del monoplaza es muy diferente, el término exponencial hace que el valor de $F_{zfrt_{porp}}$ decaiga exponencialmente. Por ello, no es de extrañar que, si la parte delantera toca en algún momento el suelo, es decir $FRH = 0$, $F_{zfrt_{porp}} = 0$, lo que representa la desaparición instantánea de carga aerodinámica.

Los siguientes gráficos extraídos del mismo artículo muestran una comparación bastante visible entre la referencia del coche de GP2 cuando circula en una recta a velocidad creciente con sus respectivos mapas aerodinámicos originales #Setup1 (línea azul), y el comportamiento del mismo, pero siendo implementados en tales mapas las funciones decadentes exponenciales descritas (línea roja) [40]. Es decir, uno simula un comportamiento idílico sin marsopeo y el otro sí que lo recrea. Como resultado, se observa una combinación compleja y cíclica de rebote de los ejes trasero y delantero, además de cabeceo del vehículo, comportamiento muy semejante al marsopeo real de los monoplazas actuales de F1.

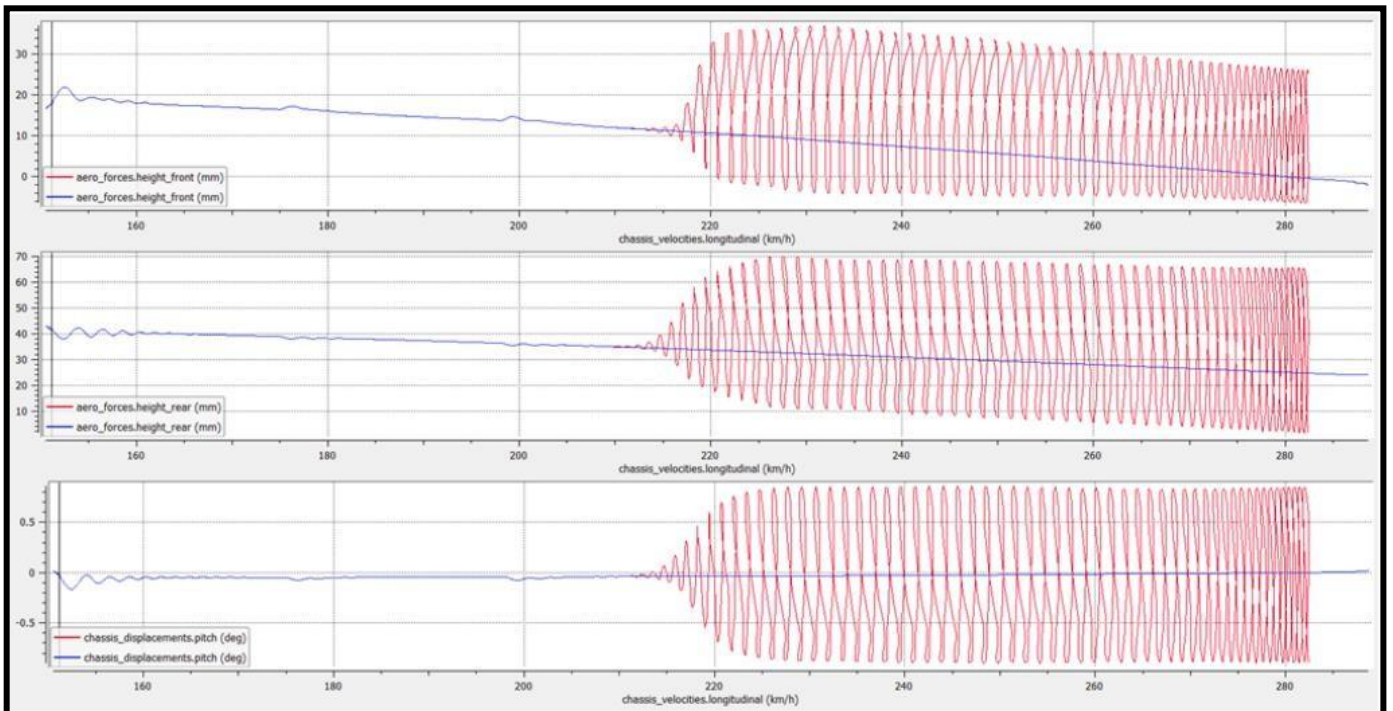


Figura 39. (Arriba) variación de altura eje delantero en función de la velocidad; (medio) variación de la altura del eje trasero; (abajo) desplazamiento vertical del chasis. (Fuente [40])

El primer y segundo gráfico muestra la variación del *front ride height* y *rear ride height* respectivamente en base a la velocidad ascendente que va adquiriendo el vehículo. Como se ilustra, pasados los 210 km/h, el vehículo comienza a experimentar *marsopeo*, siendo la amplitud del mismo incrementada en relación al aumento de velocidad. El *porpoising* en el eje trasero comienza ligeramente antes (segundo gráfico) y su amplitud es mucho mayor, abarcando una variación dinámica de la altura de manejo de aproximadamente 60 mm. En cambio, se aprecia como el eje delantero llega a tocar claramente contra el asfalto, acentuando más si cabe la problemática. En lo que respecta al tercer gráfico, se muestra el cabeceo o desplazamiento del chasis en respuesta al incremento de velocidad, llegando a adquirir la amplitud cerca de 2°. De esta manera, se observa que la frecuencia y la amplitud son bastante elevadas, siendo la primera cada vez más crítica ante el incremento de velocidad.

Los siguientes gráficos, sin embargo, reflejan la carga aerodinámica delantera y trasera respectivamente, y la aceleración vertical del chasis. Los tres casos, también, en función del incremento de velocidad. Se puede observar, no solo la pérdida súbita de carga aerodinámica en cada oscilación y cómo de rápido esta es recuperada, sino también como perjudica el rebote a la consecución de la carga aerodinámica teórica máxima representada por la línea azul del *#Setup1*, especialmente en el eje delantero. Por otra parte, la aceleración vertical adquiere valores máximos de hasta 0,6 G, viéndose sensiblemente reducida a partir de valores de velocidad muy elevados.

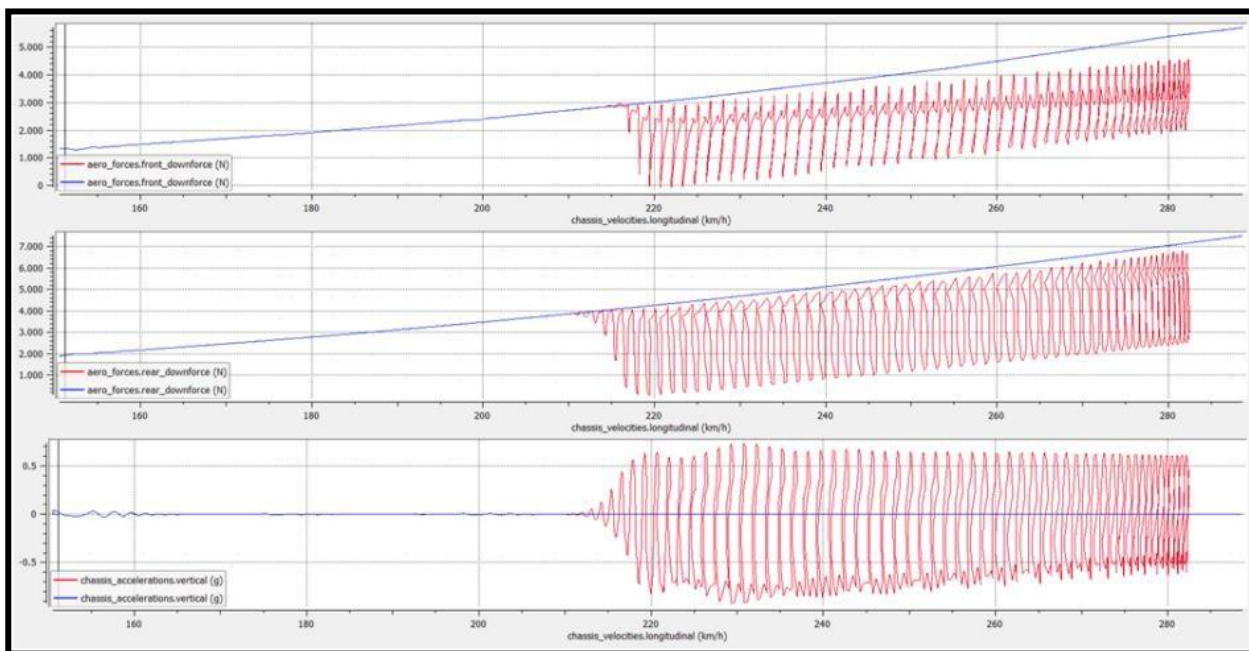


Figura 41. Variación de la carga aerodinámica en función de la velocidad; (arriba) carga en el eje delantero; (medio) carga en el eje trasero; (abajo) aceleración vertical del chasis. (Fuente [40])

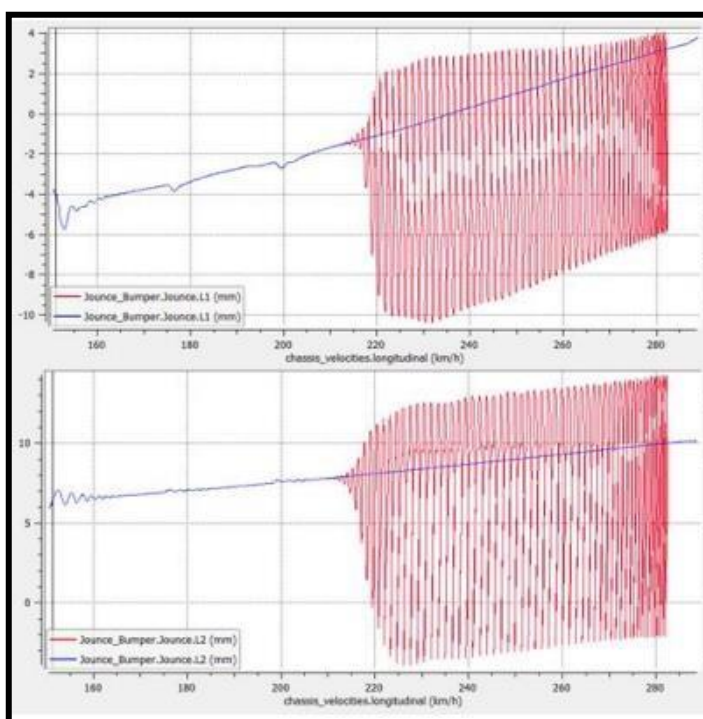


Figura 40. (arriba) rebote de la suspensión delantera; (abajo) rebote suspensión trasera. (Fuente [40])

Este último gráfico, refleja la variación de la posición de la suspensión delantera y trasera respectivamente. En otras palabras, estudia el rebote que los brazos de suspensión experimentan con el incremento de velocidad. Se observa que la amplitud del rebote en el eje delantero es menos pronunciada que en el trasero, pero aun así considerable.

4.2 NATURALEZA MECÁNICA

Una vez entendido el mardo desde su vertiente aerodinámica, se procederá a analizarlo desde un punto de vista mecánico.

La suspensión es el sistema de componentes que conecta las ruedas del vehículo al chasis de este, proporcionando estabilidad al absorber energía elástica de las irregularidades del asfalto. Así pues, intenta maximizar la adherencia hacia este último minimizando la variación de cargas en los neumáticos. Para el fenómeno que este proyecto atañe, se estudiará el comportamiento del 3r muelle, más conocido globalmente por su término anglosajón "**Heave Spring**".

Las fuerzas que una suspensión de un coche de carreras tiene que soportar vienen dadas por los siguientes movimientos [42]:

- **Balanceo** → Rotación del coche alrededor del eje X, característico cuando este sufre fuerzas longitudinales al trazar curvas.
- **Cabeceo** → Rotación del coche alrededor del eje Y, característico cuando este sufre transferencia de masa hacia adelante/ atrás, al frenar/acelerar respectivamente.
- **Heave** → Fuerza vertical experimentada por el chasis inducida por cargas aerodinámicas a lo largo del eje Z.

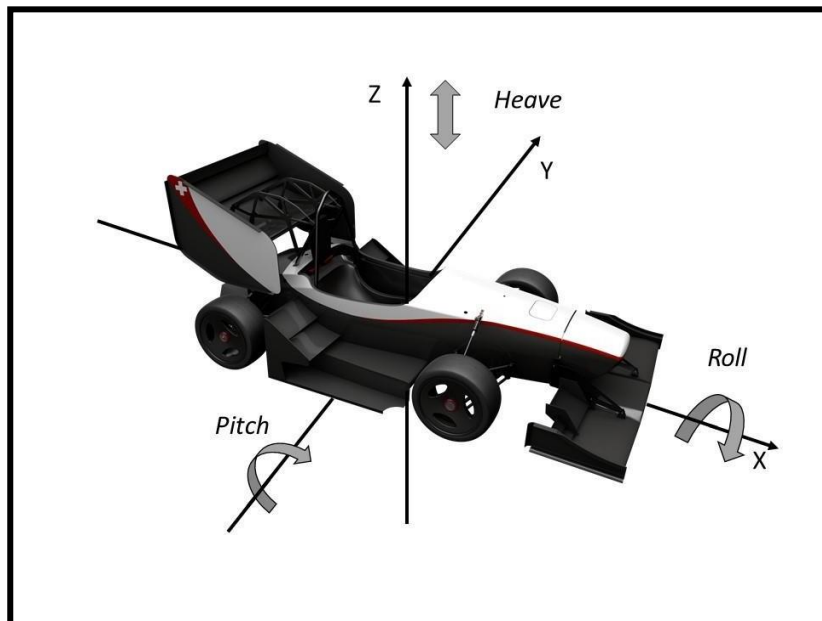


Figura 42. Fuerzas soportadas en tres dimensiones de las suspensiones. (Fuente [42])

La ilustración siguiente muestra una representación 3D del sistema de suspensión del eje trasero del equipo Mercedes Benz F1.

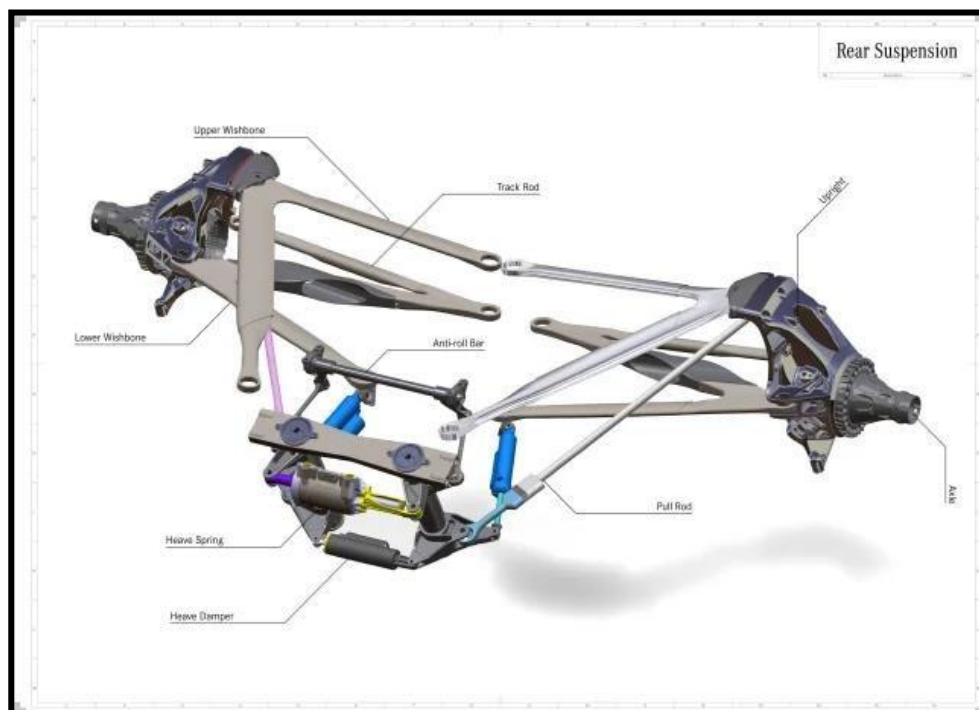


Figura 43. Suspensión trasera del Mercedes W09. (Fuente [41])

Como se puede observar, hay un muelle llamado *heave* y un amortiguador (“*heave damper*”) debajo de este, encargados de absorber la energía del coche cuando este sufre *heave*. Este es el caso cuando el coche se comprime a consecuencia de la carga aerodinámica ganada, o cuando se expande al ganar altura de manejo.

En base a la imagen aportada, se podría resumir la problemática del marsopeo de la siguiente manera [37]: A medida que el coche comienza a generar niveles más grandes de efecto suelo y a reducir su altura de manejo, se produce una compresión del tren trasero. En el sistema de suspensiones de la imagen, ambos *pull-rod* se estirarían, provocando que las barras de torsión rotasen sobre sus ejes y el muelle *heave* se estirase. Por lo tanto, a medida que el coche reduce su distancia al suelo, más se estira este 3r muelle y más energía elástica acumula eventualmente. Cuando el coche llega tan abajo que colapsa aerodinámicamente, ese *heave* intenso que comprimía las suspensiones y que permitía que se acumulase la energía elástica del 3r muelle, desaparece súbitamente. De esta manera, no hay ninguna fuerza externa inducida que siga sosteniendo la energía elástica del muelle, siendo esta liberada de golpe, regresando el muelle abruptamente a su posición inicial, y con ello, expandiendo las suspensiones en un *heave* vertical positivo.

Así pues, el marsopeo viene dado de una cíclica compresión y expansión del muelle *heave*. Como todo muelle, este viene complementado con un amortiguador que ayuda a disipar la energía elástica generada de su deformación. Los ingenieros juegan con diferentes parámetros a la hora de establecer el *setup* óptimo de un monoplaza, entre ellos la **rigidez del**

muelle. Contra más rígido sea este, más esfuerzo conlleva deformarlo y más energía elástica se acumula por milímetro deformado, por lo que más dificultad conlleva disiparla y que no afecte a la estabilidad del coche. De esta manera, los ingenieros tienen que encontrar el punto óptimo en el que no se experimente un severo rebote y el coche sea lo más estable posible.

Sin embargo, y a diferencia de los muelles con rigidez lineal que absorben las fuerzas de balanceo y cabeceo, **la rigidez del heave spring es no lineal** [40]. Es decir, el esfuerzo de deformación del 3r muelle no es lineal, sino que aumenta cada vez más contra más deformado se encuentre el muelle, por lo tanto, se dice que es un muelle progresivo. Esto se debe a que, junto a este sistema de muelle y amortiguador, se encuentra un tope de goma que trabaja en paralelo con el muelle.



Figura 45. Suspensión de un vehículo con tope de goma al final de su recorrido (no se trata de una suspensión de un F1). (Fuente: Emd Auto)

A continuación, se muestra muy simplificada la variación del downforce en relación con la altura de manejo, pero esta vez añadiendo un tope trabajando en conjunto con el muelle heave del sistema de suspensión trasera del vehículo [38].

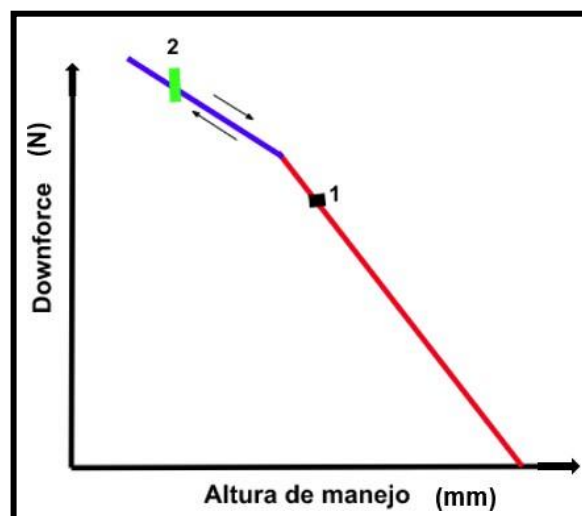


Figura 44. Variación de la altura de manejo y carga aerodinámica con un tope instalado en el muelle heave. (Fuente [38])

La línea roja representa el rango de alturas en los que llega a trabajar el muelle, y la línea azul, el momento en el que empieza a trabajar el tope de goma. Además, el punto verde hace referencia al punto final de compresión del tope.

Resumidamente, ante el aumento de carga aerodinámica, el muelle *heave* empieza a deformarse con una rigidez lineal al experimentar una precarga (el *heave*). Sigue el muelle deformándose hasta un punto en el que la cabeza de este hace contacto con el tope de goma y es ahora el tope quien se ve deformado. La rigidez elástica del tope es bastante mayor a la del muelle. Esto es debido a que contra más fuerza se le es aplicado al tope de goma, más se resiste en última instancia a ser deformado, de ahí, que el conjunto del 3r muelle tenga una rigidez elástica no-lineal.

Por lo tanto, cuando entra en juego el tope, el coche experimenta cada vez mayor velocidad vertical. Dicho en otras palabras, el muelle antes de llegar a su compresión máxima contra el tope (*punto 2*) y finalizar su recorrido, se aproxima a este final de recorrido a una cierta velocidad incrementada por la aceleración vertical que sufre el chasis a consecuencia del *heave*. De esta manera, y al actuar el tope como un muelle de alta rigidez, cuando el muelle *heave* se descomprime libera cantidades altas de energía elástica acumulada y el 3r muelle vuelve con una cierta velocidad (fruto de esa liberación de energía) a su posición original (*punto 1*). Es decir, punto en el cual el coche gana altura repentina tras perder grandes cantidades de carga aerodinámica. El ciclo se volvería a repetir de nuevo de manera cíclica hasta que el efecto suelo inducido desapareciese.

Se puede afirmar que el marsopeo en este caso es provocado por una **característica mecánica no deseada**, que son los topes del *heave spring*, encargados de absorber grandes cantidades de energía provenientes de la aceleración vertical que sufre el vehículo en cada oscilación, pero en este caso jugando un papel contraproducente, al liberar demasiada energía elástica de vuelta.

Así pues, se han repasado los detonantes aerodinámicos y mecánicos del *porpoising*, que, pese a ser motivos aparentemente diferentes y que no tienen nada que ver el uno con el otro, ambos se complementan y actúan en sintonía generando el rebote que exteriormente se vislumbra. Por este motivo, ante la búsqueda de una resolución y con tal de atacar la raíz del problema, hay que tener en cuenta ambas problemáticas, porque una complementa a la otra.

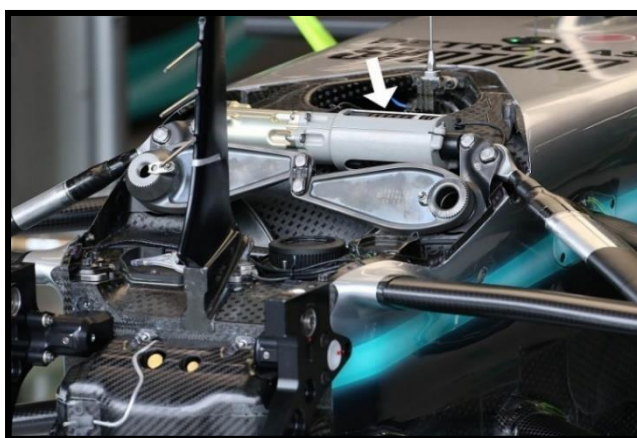


Figura 46. Muelle Heave del Mercedes (flecha blanca). (Fuente [41])

5 RELACIÓN DEL REGLAMENTO DE 2022 CON EL EFECTO MARSOPA

La temporada 2022 del Campeonato del Mundo de Fórmula 1 fue testigo de unos de los cambios de normativa técnica en la aerodinámica más revolucionarios y categóricos de la historia del automovilismo. Desde el gran último cambio de reglamentación, en 2014, se ha vivido una época- la de la era híbrida- en la que más allá de competir con monoplazas con motores híbridos V6, no se han vivido campeonatos llenos de emoción y espectáculo como en antaño. La escudería Mercedes Benz dio con la tecla y durante 8 años, de 2014 a 2021, ha ido siempre un paso por delante del resto, al mismo tiempo que la aerodinámica cobraba mucha importancia en los equipos, especialmente de 2017 a 2021.

En 2017 los coches se agrandaron en tamaño y volvieron a ser introducidos en ellos muchos elementos generadores de carga aerodinámica que hacían volar al monoplaza en curva. De esta manera, en esta última época se han vislumbrado a los monoplazas de Fórmula 1 más grandes, más veloces a una vuelta y que más rendimiento han ofrecido. No obstante, ante la priorización de la generación de grandes cantidades de carga aerodinámica, los monoplazas generaban muchos vórtices y dejaban a su paso estelas de aire sucio muy turbulentas. A una vuelta, en sesiones de clasificación, estos monoplazas ofrecían mucho espectáculo a los aficionados por lo veloces e imponentes que eran. Pero el día de la carrera, este aire sucio que dejaban a su paso, dificultaba en exceso la persecución de los coches de detrás. Los pilotos sufrían más inestabilidad al volante y al no recibir el monoplaza perseguidor flujo de aire laminar, sino muy turbulento, el coche generaba mucha menos carga que el coche de delante, y de esta manera, la conducción se veía más forzada, con lo que la degradación de los neumáticos se agravaba severamente. Por lo tanto, eran muchas las ocasiones en las que se vivían carreras con muy pocos adelantamientos, en las que los pilotos, lejos de arriesgar la persecución y el adelantamiento, preferían guardar distancia, conservar neumáticos y probar de ganar posiciones de manera estratégica en las paradas en boxes. Así pues, las carreras se volvían monótonas y el espectáculo y batalla cuerpo a cuerpo brillaba por su ausencia.



Figura 47. Comparativa de la pérdida de carga aerodinámica de un coche perseguidor a 20 y 10 m. Arriba coche de 2021; abajo coche de 2022. (Fuente: Formula 1)

Ese monopolio de Mercedes, sumado al pobre espectáculo que estos coches podían ofrecer en carrera en consecuencia de la gran cantidad de aire sucio que generaban, obligó a que la FIA tomará cartas en el asunto. Así pues, y con el fin de mejorar el espectáculo y la facilidad para adelantar en carrera, se aprobó un cambio de normativa técnica, inicialmente para 2021, pero se aplazó a 2022 por el retraso y pérdidas económicas que generó el Covid19.

Como se observa en la Figura 47, se estudió que la pérdida de carga aerodinámica que un coche perseguidor de 2022 sufriría a una cierta distancia sería significativamente menor que uno de 2021. Principalmente, porque esta normativa miró de minimizar y simplificar en exceso la aerodinámica de estos monoplazas, reduciéndose así en gran medida la estela turbulenta a su paso. Además, con tal de garantizar más igualdad, muchas piezas o componentes para todas las escuderías iban a ser estandarizadas, y se estableció un límite presupuestario de 150 millones de euros al que los equipos se tenían que ceñir de cara a la fabricación del monoplaza de 2022. De esta manera, se buscaba que los equipos tuvieran los mismos recursos iniciales para la fabricación de su bólido.

Lo que seguro que no esperaban los ingenieros era encontrar evidentes problemas de rebote, nada más poner en pista por primera vez el coche diseñado. A continuación, se estudiará la correlación existente entre el reglamento de F1 de 2022 y el fenómeno, es decir, los cambios estipulados que desataron esta problemática. Para ello, se analizará qué modificaciones aerodinámicas, mecánicas y de test, contribuyeron al surgimiento del marsopeo en los test invernales de pretemporada en Barcelona.

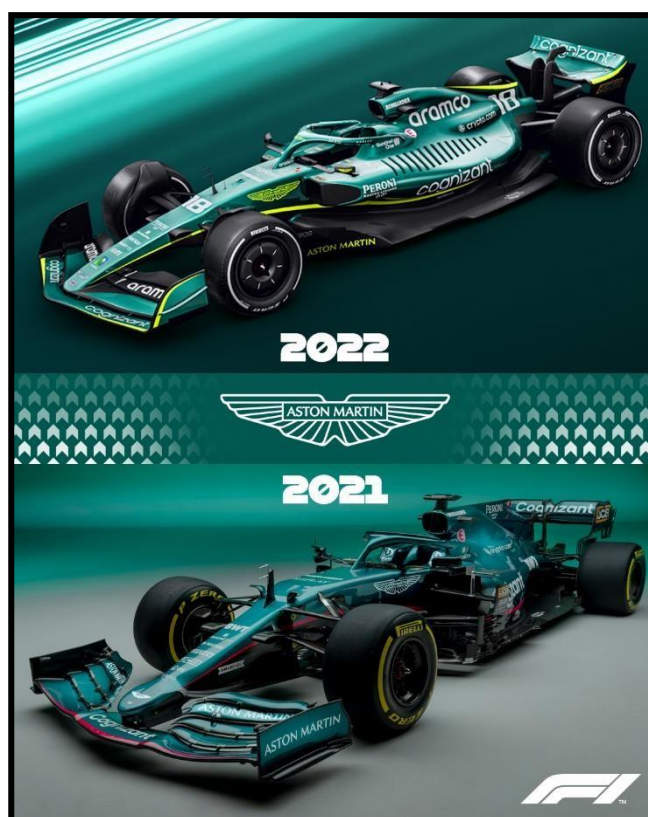


Figura 48. Comparativa entre la especificación de Aston Martin en 2021 (abajo) y la de 2022 con el cambio de reglamento (arriba). (Fuente: Fórmula 1)

5.1 CAMBIOS AERODINÁMICOS RELEVANTES

Previamente se ha comentado que 2017 marcó el inicio de una corta era en la que la generación de carga aerodinámica era sumamente importante, tras unas ligeras iteraciones del último reglamento técnico aerodinámico hasta ese momento. En 2018 los ingenieros tenían mucha libertad aerodinámica y añadían bastante complejidad a sus elementos aerodinámicos, implementando, por ejemplo, *bargeboards* muy altos. En 2019 la FIA instó a los equipos a simplificar ligeramente los alerones delanteros en forma de cascada y a rebajar considerablemente la altura de los *bargeboards*. Por último, en 2021, el año previsto inicialmente para realizar el cambio revolucionario de reglamentación, se quiso reducir la carga aerodinámica generada recortando muy sensiblemente la parte más trasera del fondo plano y reduciendo los complejos deflectores del difusor [45]. Los monoplazas de esa era generaban mucha cantidad de aire sucio y turbulento en su estela debido a que gran parte de sus elementos aerodinámicos y generadores de vórtices eran dispositivos “*outwashing*”, es decir su geometría era diseñada para desviar y redirigir el flujo de aire al exterior para que este evitará a los neumáticos. De esta manera, cuando el aire es desviado hacia fuera del monoplaza, la estela que deja a su paso es mucho **más amplia**. Contra más grande y amplia sea esta estela originada, más aire sucio dejará el monoplaza a su paso, comprometiendo de esta manera el rendimiento aerodinámico de un coche perseguidor lo suficientemente cerca. Por eso, el reglamento de 2022 no dejó de ser otra iteración en el conjunto de modificaciones pasadas, pero a gran escala, en la que se buscó modificar la aerodinámica de los coches reduciendo en lo máximo la estela de aire sucio generado, sin comprometer en exceso el rendimiento global de los vehículos.

La sucesión de modificaciones aerodinámicas del monoplaza de Fórmula 1 de 2022 se descompondrá en el análisis de tres áreas de gran relevancia en cuanto a la generación de carga aerodinámica de un monoplaza: el alerón delantero, el difusor y el fondo plano.

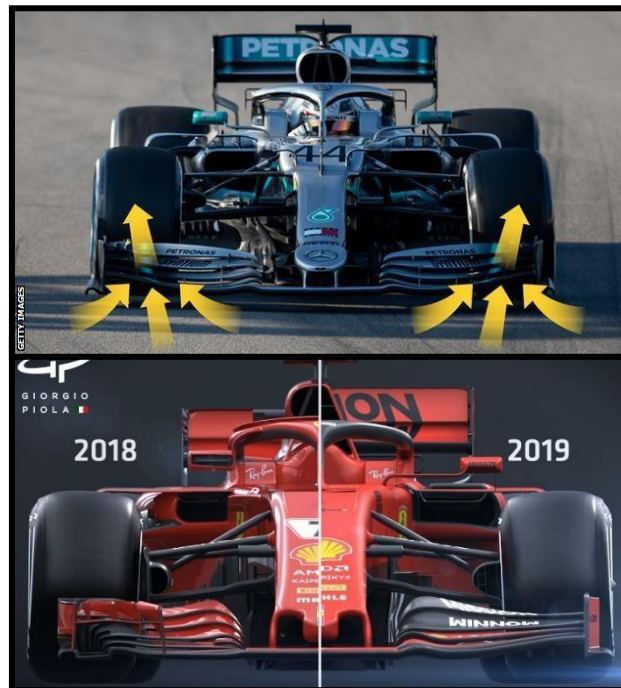


Figura 49. Elementos *outwashing* en el alerón delantero del Mercedes de 2018 (arriba); Diferencias aerodinámicas en la sección frontal del Ferrari en 2018 y 2019 (abajo). (Fuente: Motorsport)

5.1.1 ESTUDIO NOVEDADES DEL EJE DELANTERO

- En líneas generales, el alerón delantero fue simplificado notoriamente, con el objetivo de reducir mayormente elementos complejos que ayuden a la generación de vórtices.
- *Endplates* de mayor dimensión y altura, más verticales, con elementos complementarios generadores de vórtices eliminados. En su lugar, se usó un “*footplate*” en la cara exterior del *endplate*, un generador de vórtices mucho más simple.
- La sección central Y-250, responsable del conocido vórtice Y-250, fue eliminada. El artículo 3.9.3 del reglamento técnico decía [44]: **“La carrocería declarada como punta del alerón delantero debe ser de un solo volumen sin aberturas.”**
- Implementación de grandes envolturas o cubiertas sobre los neumáticos delanteros que facilitan que el flujo pase por encima de los neumáticos sin ver comprometida su estabilidad y orden por estos [46]. Es decir, parte del flujo turbulento generado normalmente por estos era atrapado por esta cubierta, permitiendo que menos flujo desordenado y caótico fuese dirigido a partes importantes del coche. Se trató de un componente estandarizado, por lo que no se permitieron modificaciones en la estructura y geometría de este. Tal como dictamina el artículo 3.13.7 del reglamento técnico [44]: **“Una sola cubierta de rueda por cada rueda debe fijarse rígidamente a la llanta de manera que tenga la misma velocidad de rotación que la rueda a la que está conectada y forme un sello aerodinámico con la llanta. La superficie exterior del Cubre Ruedas debe tener la forma definida por RS-FWH-COV para las ruedas delanteras y por RS-RWH-COV para las ruedas traseras.”**
- Los *bargeboards* fueron completamente eliminados, y en su lugar se emplearon deflectores acanalados en la parte delantera superior del suelo del coche. Hay que recordar que los *bargeboards* tienen un ángulo de salida o extracción de flujo que facilita generar carga aerodinámica a costa de producir más estela turbulenta y reconducir mejor los vórtices [46].



Figura 50. Nuevo concepto de alerón delantero de 2022, con flechas señalando las cubiertas de las ruedas y los nuevos endplates. (Fuente: Motorsport week)

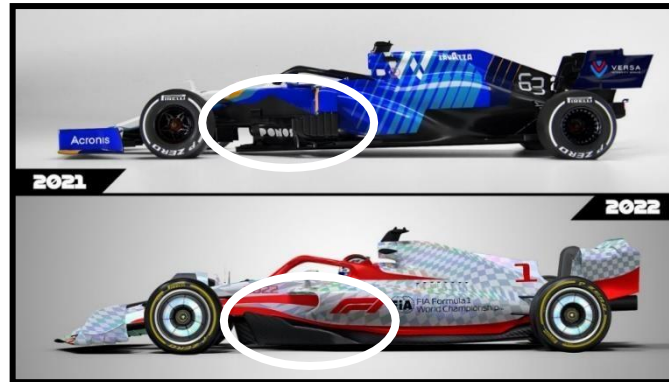


Figura 51. Diferencias en el diseño de los bargeboards de 2021 y 2022.
(Fuente: Fórmula 1)

5.1.2 ESTUDIO NOVEDADES DEL DIFUSOR

- El difusor era mucho más simple que en años anteriores, teniendo claramente una sección más pequeña al tener menor amplitud.
- Se permitieron hacer algunos ligeros recortes en la geometría, pero no implementar “winglets” o aletines aerodinámicos deflectores en la geometría del difusor. En sustitución de esos “winglets” se debía usar encima del difusor un “beam wing”- en español “ala en forma de viga”-, que trabajaba en consonancia con el difusor ayudando a sacar el flujo de este hacía el exterior [45]. El punto 3.10.3 del reglamento técnico dictamina [44]: **“La carrocería declarada como “viga del alerón trasero” no debe estar en ningún punto a menos de 10 mm de distancia del tubo de escape una vez completamente definido de acuerdo con el artículo 3.8.2.”**
- El alerón trasero sufrió ligeras modificaciones, viéndose la punta sobresaliente del *endplate* y sus cortes en la geometría totalmente eliminados [46]. Así pues, las puntas del alerón trasero pasaron a ser redondeadas con un cierto radio, con el objetivo de reducir los vórtices tan característicos propicios de esa parte del coche. El artículo 3.10.4 declara [44]: **“La carrocería declarada como “Carrocería de endplate del alerón trasero” debe ser de un solo volumen sin aberturas; En cualquier plano X o Z contienen solo una sección cerrada. Además, cualquier sección de este tipo, en cualquier plano X o Z, no debe contener un radio de curvatura cóncavo externo inferior a 100 mm”**.
- Las paletas de los frenos traseros (“*cake tin*” en inglés), pieza también estandarizada, fueron extremadamente simplificadas [45]. Además, era un elemento en el que no se podía trabajar ya que ello contribuiría a generar más aire sucio y vórtices provenientes de las ruedas traseras.
- En líneas generales, el difusor tenía menos complejidades, como deflectores o *winglets* detallados, ya que el concepto de este era diferente en 2022 en relación a pasadas campañas. La mayoría de las veces interesaba añadir *winglets* y ranuras diminutas y complejas con tal de tener un mejor control de la estela o aire sucio en la parte baja del coche detrás de los neumáticos traseros y extraer este hacía fuera

(por eso estos son elementos *outwashing*). Sin embargo, en 2022 se pretendió innovar con un concepto de difusor que, lejos de extraer el aire hacía el exterior y alejarlo del monoplaza, lo extraía hacía arriba ("*upwashing*") y hacía dentro especialmente [45]. De esta manera, el flujo saliente del coche producía una estela de mucha menor amplitud que en otros años, pero, en consecuencia, el difusor perdía eficacia y la carga aerodinámica capaz de generar era menor que en antaño. Por eso, al haber tanto en el difusor como en el suelo del coche una eliminación de detalles y elementos complejos generadores de vórtices, era mucho más difícil tener un sólido control de la estela turbulenta provocada por las ruedas traseras. Además, las paredes laterales del difusor eran ese año de especial importancia ya que eran bastante altas, hasta el punto de tener que estar muy cerca del suelo, razón que se detallará más adelante.

Por lo tanto, la estructura del cuerpo del eje trasero era destinada a redirigir hacía dentro la estela de aire, y en última instancia hacía arriba, evitando a toda costa implementar componentes generadores de vórtices y que desviasen la estela hacía fuera.



Figura 53. Difusor especificación de 2022. (Fuente: Motorsport)

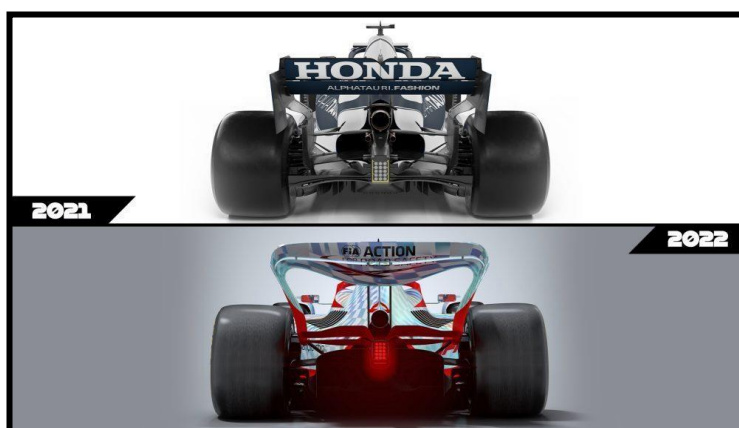


Figura 52. Diferencias en el diseño y geometría del difusor entre especificación de 2021 y 2022. (Fuente: Formula 1)

5.1.3 ESTUDIO NOVEDADES DEL FONDO PLANO

Dado el hecho de que las modificaciones extensas en el alerón delantero, trasero y difusor contribuyeron globalmente a una reducción significativa de la carga aerodinámica que estos previamente generaban otros años, el suelo del coche cobró especial importancia con tal de recuperar parte de ese *downforce* perdido. Al no disponerse de control sobre la estela de aire sucio y los vórtices generados, el fondo plano buscaba recuperar parcialmente la succión perdida. Por eso, fue una estructura muy importante en este cambio de reglamentación técnica:

- Previamente, el *plano step* (plano del suelo del coche coincidente con los bordes exteriores de este) tenía una cierta distancia respecto al *plano de referencia*, que es el punto más bajo del monoplaza a excepción de los neumáticos. En 2022, el *plano step* bajó al mismo nivel que el plano de referencia, es decir, eran coincidentes, por lo que todo el suelo del coche bajó de altura globalmente [45]. Tal como dicta en el reglamento técnico el artículo 3.5.1.d [44]: **“La carrocería declarada como “Carrocería del suelo” debe estar en el plano de referencia si es visible desde abajo y dentro de los límites de RS-FLOOR-MID cuando se ve desde abajo.”**
- Al estar por lo tanto los bordes exteriores del suelo del coche mucho más cerca respecto al suelo, esa distancia se vio mucho más estrechada, resultando mucho más complicado al flujo de aire de alta presión encima del fondo plano escaparse a la zona de baja presión debajo [46]. De esta manera, se producía un sellado óptimo de ambos flujos con diferencial de presión, proporcionando esto cantidades importantes de carga aerodinámica.
- Detalles en el suelo como nervios o deflectores quedaban eliminados, así como geometrías complejas que fuesen potenciales generadores de vórtices y deflectores del aire sucio hacía fuera. Asimismo, y respecto a la especificación de 2021, el borde final del suelo debía distanciarse mucho más respecto a las ruedas traseras. De esta manera, el flujo era redireccionado ordenada y limpiamente hasta el difusor por medio de numerosas vías acanaladas a lo largo del suelo del coche, en vez de por deflectores. Es por eso que la especificación de fondo plano de 2022 tenía similitudes y semejanzas con un túnel de Venturi, ya que los canales y la forma de ala invertida que tenía producían el mismo efecto en el flujo que el que haría el propio principio de Venturi [46].

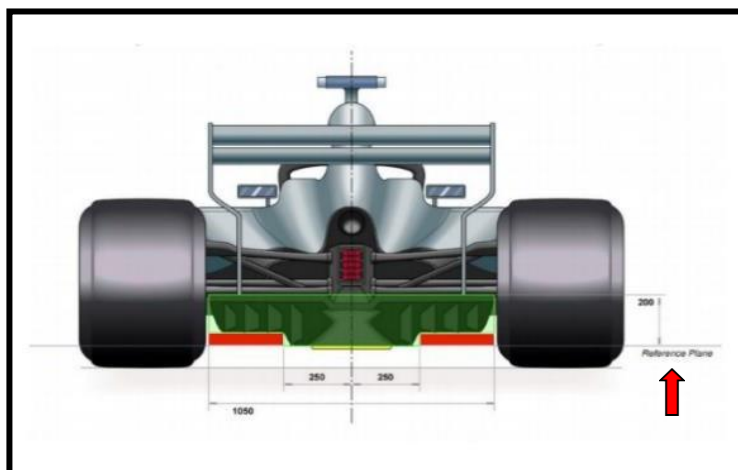


Figura 54. El plano step baja hasta la altura del plano de referencia (señalado con la flecha). (Fuente: Formel 1)

Una vez contextualizados los cambios aerodinámicos más relevantes de la especificación de monoplace para 2022, se puede dar con puntos claves que contribuyen a la aparición del marsopeo.

Como se ha explicado, la FIA pretendía priorizar el espectáculo y batalla cuerpo a cuerpo por encima de la estética y velocidad. Por este motivo, se buscó a toda costa empujarse la estela de aire sucio generada por estos monoplaces, y para ello se limpió por completo la superficie de los bólidos de cualquier elemento generador de vórtices o contribuyente a desviar el flujo sucio y agrandar la estela de este. De esta manera, los coches perdían cantidades importantes de carga aerodinámica, pero para recuperar esta de una manera que no comprometiese la estela y turbulencia que generaba el vehículo, entraba en escena el fondo plano de este. El fondo plano y el difusor, como se ha comentado páginas atrás, son elementos que generan grandes cantidades de carga aerodinámica, pero apenas resistencia al avance y aire sucio. Para que el difusor rinda efectivamente, el flujo que pasa por él debe tener algo de orden, cosa que los neumáticos traseros no ayudan mucho en ello. De esta forma, con tal de separar el flujo caótico de los neumáticos traseros de la salida del difusor, este último tenía en sus extremos paneles verticales bastante altos a escasa distancia del suelo. Simplificadamente, estas paredes laterales actuaban a modo de barrera impidiendo que el flujo sucio de las ruedas traseras se mezclase con el flujo limpio saliente del difusor. **Es por este motivo, que, en 2022, interesaba llevar los monoplaces con una altura de manejo muy baja**, ubicándose ahí el pico de rendimiento óptimo de un monoplace. Tanto para potenciar el efecto suelo y sellador en el fondo plano, como para llevar las paredes del difusor lo más pegadas al suelo posible y optimizar este “efecto barrera” [45].

De esta manera, es por eso por lo que los coches debían ir bajos en 2022, siendo este uno de los principales, sino el gran, detonante aerodinámico del *porpoising*.

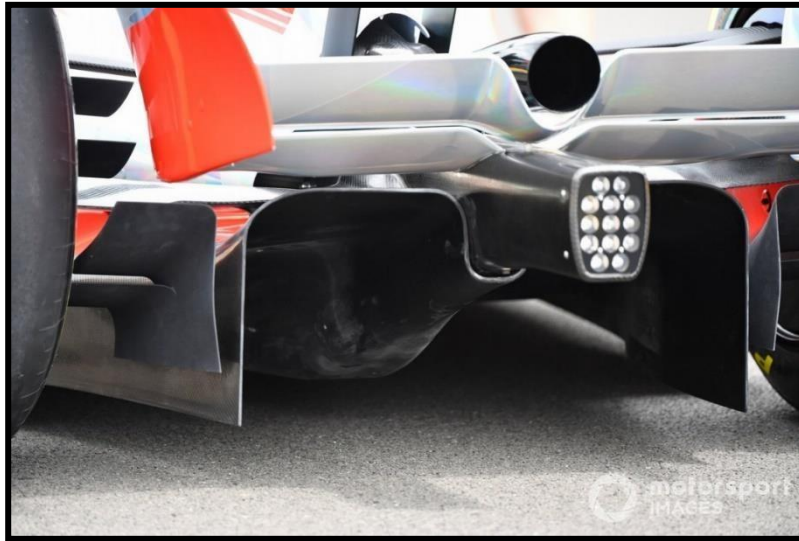


Figura 55. Paneles laterales verticales del difusor a una gran proximidad del suelo.
(Fuente: motorsport)

5.2 CAMBIOS MECÁNICOS RELEVANTES

En el apartado anterior se ha concluido que, fruto de los cambios normativos aerodinámicos, el buscar una muy baja altura de manejo contribuyó al surgimiento del marsopeo. Esto es debido a que contra más cerca del asfalto el coche se encuentre, más cerca el fondo plano del coche se encontrará del punto de colapso aerodinámico.

Por ello, en 2022 mantener un control de la altura de manejo era previsiblemente de gran importancia, ya que había una muy delgada línea entre conseguir el pico máximo de rendimiento aerodinámico y romper repentinamente el *downforce*. Dicho de otra forma, era de suma trascendencia efectuar un correcto control del movimiento *heave*, ya que este es quien a la postre permite a las suspensiones traseras comprimirse hasta cierto punto. A priori, y a vista de la problemática posterior del marsopeo, a los ingenieros les convenía para el diseño del prototipo de 2022 utilizar muelles *heave* de alta rigidez elástica para dificultar a las suspensiones comprimirse y evitar que estas hagan esto en exceso. Sin embargo, la normativa técnica de 2022 limitó en exceso la implementación de mecanismos para controlar las oscilaciones, haciendo que los equipos saliesen a pista inicialmente con coches muy bajos y con muelles poco rígidos. A continuación, se detallan normas de aspecto mecánico que impidieron subsanar el marsopeo en 2022.

En primer lugar, en la normativa técnica, la FIA dejó bien claro que estaba prohibido el empleo de muelles que ayudasen a controlar activamente la altura de manejo del monoplaza, por ejemplo, con alguna ayuda hidráulica. Según el artículo 10.2.6.d [44]: **“Además, los siguientes sistemas o configuraciones no están permitidos: Cualquier forma de control o alteración de la altura de manejo a través de sistemas de auto nivelación o circuitos de retroalimentación.”**

No solo eso, sino que sistemas como amortiguadores de inercia también eran prohibidos. Estos, ubicados en el sistema de suspensión, actúan como elementos de resistencia a las aceleraciones verticales del monoplaza. Es decir, son capaces de inhibir hasta cierto grado movimientos verticales de alta aceleración (propio del marsopeo) a través de las suspensiones [45]. Definitivamente, no hubiese solucionado ni mucho menos el marsopeo como tal, pero sí que hubiese sido de gran ayuda en general para diluir la severidad del rebote. Tal como dictamina el artículo 10.2.6.a [44]: **“Además, los siguientes sistemas o configuraciones no están permitidos: Cualquier respuesta de los elementos de suspensión a las aceleraciones del cuerpo y/o la aceleración angular de los balancines (por ejemplo, cualquier inertizador, amortiguadores de masa, válvulas sensibles a la aceleración en los amortiguadores).”**

Además, en 2022, Pirelli (el suministrador oficial de neumáticos para la Fórmula 1) utilizó neumáticos de mayor tamaño con llantas que pasaron a ser de 13” a 18”. Al ser neumáticos de dimensiones diferentes, tenían propiedades y características diferentes, por lo que los equipos apenas disponían inicialmente de datos relevantes técnicos sobre estos al no haber sido usados nunca. Las llantas de estos neumáticos eran lenticulares y ofrecían más sustentación [46].

Por lo tanto, había algunas limitaciones mecánicas en el reglamento técnico que impedían una posible erradicación del marsopeo por medio de mecanismos mecánicos, dificultando más aún una solución efectiva para todas las escuderías.

5.3 RESTRICCIONES DE TÚNEL DE VIENTO RELEVANTES

Los equipos, antes de iniciar los test invernales de pretemporada, diseñan el prototipo o especificación del monoplaza de dicho año. Como la primera vez que pueden poner el monoplaza en pista para recolectar datos reales en pista son en los test de pretemporada, antes no les queda otra que tomar esa toma de datos en simulaciones de túnel de viento o mediante simulaciones CFD avanzadas, dos métodos que se aproximan bastante a la realidad. Los ingenieros suelen recibir datos muy valiosos tras esas simulaciones y pueden hacerse una idea más o menos clara de cómo su bólido va a comportarse aerodinámicamente en condiciones reales.

No obstante, en 2022 ningún aerodinamicista fue capaz de identificar problemas de marsopeo, pese a múltiples simulaciones en túneles de viento tecnológicamente muy avanzados, y es que algunas limitaciones en la normativa técnica tienen mucho que ver.



Figura 56. Maqueta de especificación de 2022 siendo testada en un túnel de viento.
(Fuente: Soy Motor)

De entrada, destacar que los prototipos empleados para simular en el túnel de viento no pueden superar el 60% del tamaño real del monoplaza [45]. O lo que es lo mismo, superar la escala 3:5 respecto a la realidad, lo que comporta un problema ya que contra más se ajuste a la realidad la maqueta del prototipo, más fiables y precisos serán los datos recogidos. Tal como dictaba el artículo 3.b del apéndice de la normativa deportiva sobre “*Restricted Wind Tunnel Testing* (Restricciones en test de túnel de viento)” [43]: **“Se aplican las siguientes restricciones durante el RWTT: No se puede llevar a cabo ningún RWTT utilizando un modelo a escala y un RATG que tenga más del 60 % de su tamaño completo ni se puede llevar a cabo a una velocidad del aire en el túnel de viento superior a 50 m/s medidos en relación con la escala modelo y RATG.”**

Pero eso no es todo, ya que uno de los grandes problemas del túnel de viento es su cinta. Lo ideal sería realizar la simulación con la maqueta comprimida contra la cinta simulando el movimiento *heave* del monoplaza por su consecuente ganancia de *downforce*. Pero las cintas se dañan ya que no están hechas para aguantar tanta compresión de los coches contra está a tanta velocidad. Dicho de otra manera, contra más comprimido por la fuerza de sustentación negativa se encuentra un monoplaza, menor su altura de manejo, y se ha analizado previamente que el marsopeo es un fenómeno característico en vehículos que parten con una altura bastante baja de manejo. Por lo tanto, los ingenieros aerodinámicos podían llegar a encontrar evidentes síntomas de rebote y movimientos oscilatorios en la maqueta del prototipo si esta pudiese llegar a ser comprimida contra la cinta. Ello conlleva a que la fuerza de rozamiento de los neumáticos del prototipo contra la cinta en movimiento fuese bastante elevada, con lo que habría grandes riesgos de dañar la cinta o deteriorarla en exceso [45]. De esta manera, no salía a cuenta a los ingenieros arriesgarse a sufrir daños en ella, perjudicar la eficiencia de futuras simulaciones, y arriesgarse a sufrir pérdidas económicas en una herramienta de investigación tan prestigiosa y única como lo es un

túnel de viento. No tenían otra, pues, que efectuar las simulaciones con una altura de manejo ligeramente más elevada del que el bólido iba a llevar en la realidad una vez en pista a más de 200 km/h. Así pues, se recogían datos sensiblemente alejados de la realidad pese a una diferencia milimétrica de alturas.

Finalmente, pese a que no es lo ideal y es muy poco ortodoxo, los ingenieros con tal de analizar el marsopeo en el túnel de viento y recoger datos numéricos de gran importancia para desarrollar alternativas y soluciones, podían simular el fenómeno comprimiendo y descomprimiendo artificialmente el prototipo a escala a una cierta frecuencia y a una cierta amplitud de oscilación. Es decir, podían recrear el fenómeno encontrando la manera de modificar la altura de manejo del vehículo dinámicamente a una amplitud y frecuencia determinada. Pero el artículo 3.e del anexo de la normativa deportiva sentencia lo siguiente [43]: **“Cambios de altitud del modelo y del RATG no se pueden producir a un ritmo que requiera cambios en la altura de manejo en la línea central del eje delantero o trasero mayores que el equivalente a escala de 0,033 m/s en el auto F1 de tamaño real y/o rotación sobre la guiñada o girar los ejes a una velocidad superior a 1,0 grados/s. “**

Traducido, la normativa prohibía en el túnel de viento modificar la altura de manejo del monoplaça a una velocidad equivalente de 0,033 m/s en un monoplaça a escala real. Como se verá más adelante, los monoplaças de 2022 registraron en sus rebotes una frecuencia media aproximada de 5 Hz, es decir, 5 ciclos por segundo. En una calculadora sinusoidal, si se introducen los datos de 5 Hz y 20 mm de amplitud (hipótesis de la variación de la altura del eje trasero en los coches actuales), el pico de velocidad vertical del monoplaça es de **314,16 mm/s** [47]. Por lo tanto, la FIA con esta norma obligó a los ingenieros a variar la altura de manejo de la maqueta a una velocidad máxima 10 veces inferior a la que se manifiesta el marsopeo de los monoplaças reales en pista, o, dicho de otra forma, a simular un *porpoising* a 0,5 Hz como máximo. Como se puede presuponer e intuir, a esas frecuencias el fenómeno no se reproducía nunca, o al menos en la escala severa en la que se manifiesta en la realidad. Por lo tanto, a los ingenieros aerodinámicos no se les era permitido contar legalmente con recursos y alternativas viables para estudiar y analizar el problema en sus simulaciones, teniendo que buscar otras vías legales que no quebrantasen el reglamento.

Como se ha visto en este capítulo, el cambio normativo técnico **aerodinámico desató el problema**, y las **restricciones a nivel mecánico y de utilización del túnel de viento no facilitaron a los equipos haber solventado el problema** mucho antes.

6 EVOLUCIÓN DEL MARSOPEO A LO LARGO DEL AÑO

Una vez pilotos, ingenieros, periodistas y espectadores se quedaron atónitos ante el rebote severo de algunas escuderías en los primeros test de pretemporada, en el circuito de Barcelona Cataluña, todas las miradas estaban puestas en la carrera de los equipos en solucionar dicha problemática. Pero se dieron cuenta de que no era cosa de un día; tampoco era un tema de rigidez de suspensiones, ni problemas en el asfalto, ya que precisamente el circuito español no se caracterizaba por ser bacheado. A continuación, se detallará las cartas que tomó en el asunto a lo largo de la temporada 2022 la Federación Internacional de Automovilismo, de qué manera combatieron los equipos contra este problema, y las consecuencias negativas de este último tanto en lo que respecta al rendimiento del coche como a la salud del piloto.

6.1 INTERVENCIONES DE LA FIA

Hasta la octava carrera del campeonato, en el Gran Premio de Azerbaiyán en Bakú, la FIA no intervino en ningún momento ni dio muestras de tener la voluntad de hacer algo al respecto ante la severidad del rebote. Según el circuito, los equipos y pilotos iban con inquietud sobre cómo de severo iba a ser el rebote ese fin de semana de competición, y Bakú no fue menos. En carreras en circuitos como el de Sakhir (Bahréin), Jeddah (Arabia Saudita), Melbourne (Australia) o Imola (San Marino) los pilotos fueron testigos del preocupante rebote en las rectas largas de estos trazados. Es por eso por lo que, al dirigirse al circuito de Bakú, circuito urbano bastante bacheado y con la recta más larga del campeonato (2km), los pilotos ya estaban temiendo lo peor. Y sus presagios se hicieron realidad, especialmente para escuderías como Ferrari o Mercedes cuya problemática con el marsopeo fue un quebradero de cabeza y será analizada más adelante. Lewis Hamilton ya dio muestras de dolor al intentar salir del habitáculo de su Mercedes tras la carrera, indicio más que suficiente para la FIA para incidir en el asunto y buscar una solución.



Figura 57. Red Bull experimentando marsopeo en la recta de Bakú. (Fuente: Motorsport)

Por eso, días después, en los preludios del Gran Premio de Canadá en Montreal (19 de junio de 2022), la FIA informó a los equipos de que a partir de ese momento tendría en cuenta más que antes el artículo 1.3 del reglamento técnico [44]: **“Los comisarios pueden llegar a excluir a un vehículo cuya construcción sea considerada peligrosa”**. Por lo tanto, se comenzó una carrera por parte de todos en busca de priorizar la seguridad por encima del rendimiento en pista. Pese a tener otros deseos, los equipos no tenían otra alternativa si no querían cometer ilegalidades.

A los diez equipos de la parrilla se les comunicó que, desde ese mismo fin de semana en Canadá, las aceleraciones verticales de los monoplazas serían detalladamente monitorizadas con rigor [48]. Hay que destacar que los propios vehículos ya llevaban de por sí sensores acelerómetros debajo de estos, con lo que la Federación estudiaría los resultados adquiridos con mucho detenimiento para replantearse medidas a tomar. No solo eso, sino que aparte de las aceleraciones verticales, también iban a ser analizados los niveles de desgaste de las planchas de madera del fondo plano. En definitiva, este primer paso fue la iniciativa a comprender la problemática, para tener las herramientas precisas para dar con una solución que no comprometiera la legalidad del reglamento técnico. Pese a informar a los equipos que a finales de agosto de 2022 se publicarían una serie de medidas a seguir, sí que es cierto que se recomendó a los equipos levantar la parte trasera del coche unos 10 mm pese a la pérdida de rendimiento que eso conllevaba.

Fruto de ese planteamiento se creó un TD 039, *Técnica Directiva 039*, que fue un comité que dio permiso a la FIA para monitorizar las aceleraciones verticales y entrar en juego si en algún equipo los valores de estas eran extremos [57]. Así pues, la primera medida o puesta en escena de esta nueva directiva entró en vigor a finales de agosto, en el Gran Premio de Bélgica en el circuito de Spa-Francorchamps. Además, con motivo de ese seguimiento más cercano en el comportamiento de los monoplazas, la Técnica Directiva instó a la FIA a prestar atención al artículo 3.15.6.a del reglamento [44]: **“La carrocería no puede desviarse más de 8 mm verticalmente cuando se le aplica una carga de [0, 0, -500]N a [XR=-450, ±450, 155]. La carga se aplicará mediante un ariete de 50 mm de diámetro y un adaptador del mismo tamaño. Los equipos deben suministrar este último cuando se considere necesaria dicha prueba.”** Es decir, monitorizar que ningún monoplaza tuviese un suelo ilegal que fuese lo suficientemente bajo como para que desencadenase el rebote. Normalmente, la plancha de madera que hay debajo de los coches, servía para que la Federación fuese capaz de distinguir cuando la altura de manejo de un coche era ilegal o no. Si un coche rodaba muy bajo de altura, tendría más probabilidades de que su madera tocara y rozara con más fuerza el asfalto, por lo que al final de cada carrera se inspeccionaba el desgaste de esta plancha de madera comparando la diferencia entre el espesor inicial y el final. Así pues, la FIA dictaminó que, desde ese momento, el espesor máximo que una plancha de madera podía perder tras cada sesión eran 3 mm, siendo esta una manera que tenía de monitorizar que los equipos no tuviesen otra alternativa que levantar más el suelo para que el desgaste de dicha plancha no excediera su valor límite.

Por otro lado, se creó un A.O.M, *Acceleration Orientative Metric* (métrica orientativa de la aceleración), mediante la cual la Federación instó a los equipos a monitorizar ellos mismos estas aceleraciones verticales [56]. Es decir, la Federación dejaba cierto grado de libertad a las escuderías para que se dieran cuenta por sí mismas de cuando estaban excediendo dichos valores de aceleración vertical para que tomarán la iniciativa ellos mismos de hacer los retoques en el *setup* y en la altura de manejo necesarios. Si el equipo pese a ser consciente de registrar valores altos, gracias a los sensores, no hiciese nada por modificar la altura de manejo, la FIA entraría en escena y les obligaría a implementar una altura mínima obligatoria.

Finalmente, el 27 de agosto la FIA, junto a la Técnica Directiva, aprobó una serie de medidas y normas regulatorias por motivos de seguridad que entrarán en vigor en la próxima temporada 2023. Dichas modificaciones tuvieron un primer esbozo, con los cuales los equipos no estaban en su mayoría de acuerdo y dio de qué hablar. Pero tras una negociación con el organismo rector y los pilotos, la Federación retocó ligeramente esos cambios normativos. A continuación, se especificarán los cambios normativos más importantes para 2023 con tal de minimizar o erradicar el *porpoising* [57][68]:

- Aunque inicialmente fueron 25 mm, **los equipos se verán obligados a levantar 15 mm más el suelo del coche**. De esta manera, y viéndose todos los equipos forzados a levantar el suelo, perderán rendimiento aerodinámico, pero de manera ecuánime y, posiblemente, evitando que el coche llegue a entrar en régimen oscilatorio.
- Los comisarios serán mucho más restrictivos con la **flexibilidad del suelo del coche**. Establecerán pruebas más rutinarias para controlar que los fondos planos no flecten más de lo permitido, ya que, si un suelo no es muy rígido, al flectar en consecuencia del *heave* sufrido, el coche pierde altura y reporta una considerable ventaja sobre el resto. Por eso, los comisarios testearán la rigidez vigilando que no se produzca una deflexión vertical de más de 5 mm cuando se le aplica al suelo una fuerza tanto ascendente como descendente de 250 N. En 2022, se tenía registrado que los monoplasas flectaban 8 mm en sentido positivo y 12 mm en sentido descendente, produciéndose grandes desviaciones respecto a ese valor límite establecido para 2023.
- No solo la rigidez del suelo ha sido regulada, sino también la rigidez de los bordes del difusor. Además, el cuello del difusor, la zona en la que se produce la fase de expansión del flujo, será ligeramente levantado.
- Se contarán con sensores acelerómetros mucho más avanzados y precisos debajo del monoplasa con tal de monitorizar con más rigor y precisión las aceleraciones verticales de los vehículos.

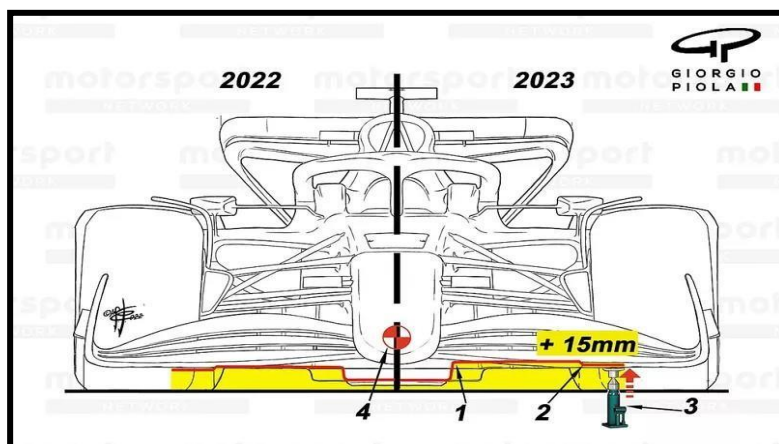


Figura 58. Aumento de la altura de manejo para los coches de 2023. (Fuente: Autosport)

6.2 ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DEL MARSOPEO EN LOS EQUIPOS

Tras los tres primeros días de test de pretemporada en el circuito de Barcelona-Cataluña, los equipos embarcaron hacia el circuito de Sakhir, en Bahréin, con tal de llevar a cabo los tres últimos días de pretemporada del 10 al 12 de marzo de 2022. Una semana después, Sakhir iba a ser testigo de la primera prueba del Mundial de 2022. Por lo tanto, los equipos no tenían margen de error a la hora de tratar de encontrar el *setup* óptimo en los últimos días de pretemporada allí, añadir mejoras, pero, sobre todo, solventando el rebote visto una semana antes en Barcelona.

Sakhir tiene una configuración de trazado muy completa y es muy semejante al de Barcelona, con largas rectas, curvas de media-alta velocidad y frenadas fuertes. En definitiva, un circuito en el que prima un buen balance aerodinámico, pero también velocidad punta elevada. De esta manera, no es de extrañar que gran parte de los monoplazas sufrieran, incluso en mayor medida, la severidad del marsopeo, cosa que preocupó a los ingenieros al ver que el problema se volvía a reproducir en un trazado diferente. A continuación, se hará hincapié en las innovaciones o algunas alternativas de algunos equipos en esos test con tal de combatir contra este fenómeno [49] [55].

- **McLaren**→ La escudería británica de Woking levantó ligeramente el suelo, pero añadió en los bordes externos de la parte trasera del suelo unas pequeñas ranuras laterales que de alguna manera hacían la función de generar vórtices. Estos diminutos componentes al generar vórtices ayudaban a que el flujo fluyese más ordenadamente hacia el difusor y aumentar la eficacia de este. Es decir, las ranuras aportan más carga aerodinámica sin tener la necesidad de bajar el suelo del coche y sufrir marsopeo. Es por eso que los británicos fueron uno de los equipos que apenas sufrió la severidad del *porpoising*. Sin embargo, su rendimiento en la primera carrera una semana después fue extremadamente pobre y paupérrimo, con lo que esas mejoras no fueron eficaces.
- **Mercedes y Ferrari**→ Se puede afirmar que estos dos equipos fueron los más afectados por el rebote; no solo en estos test, sino también en el devenir de las primeras carreras. Una de las alternativas con tal de mitigar este efecto por parte de germanos e italianos fue implementar barras de refuerzo o tirantes sobre la esquina trasera del suelo del coche. Con estos tirantes se pretendía evitar a toda costa que el suelo del coche flectase, y por ello, tener más control de la altura de manejo dinámica del coche aumentando la rigidez del suelo. Como se ha visto, demasiada flexión del suelo puede provocar que este baje tanto que se produzca esa rotura súbita del flujo debajo del coche.
- **Red Bull**→ La escudería austríaca no fue protagonista precisamente por ser víctima de la severidad del rebote. No obstante, añadieron un poco de *rake* a su monoplaza, es decir, levantaron muy ligeramente la parte trasera del coche. Esto en última instancia reduce parcialmente la carga aerodinámica generada por el túnel de Venturi, ya que, en 2022, los coches lejos de tener un *rake* muy marcado como en años anteriores, tenían un suelo mucho más plano asemejándose a un túnel de Venturi. De esta manera, Red Bull, con tal de evitar males mayores levantó un poco la trasera del coche, pero hasta un punto que no le perjudicó y le permitió mostrarse muy competitiva.



Figura 60. Apéndices generadores de vórtices en el suelo del McLaren en las pruebas de pretemporada. (Fuente: Total Motorsport)



Figura 59. Tirantes en el Mercedes para inhibir la flexibilidad del suelo ante el rebote. (Fuente: Formula 1)

Las primeras tres carreras del campeonato dejaron un escenario peculiar. Ferrari y Red Bull se mostraron como las dos claras contendientes en la lucha del Mundial, pero Ferrari, a diferencia de los austriacos, sufrió mucho el rebote especialmente a partir de velocidades altas en recta. Sin embargo, el dominador de las siete últimas campañas, el equipo

Mercedes, sufría severamente también el rebote, pero incluso tenía problemas a la hora de generar carga aerodinámica al incrementar su altura de manejo. Es decir, ni levantando el suelo (sacrificando rendimiento aerodinámico) conseguían paliar este fenómeno. Para sumar más problemas al asunto, a Mercedes se le desencadenaba el rebote mucho antes que, a Ferrari, es decir, incluso en curvas de alta velocidad, lo cual perjudicaba mucho el rendimiento del monoplaza y no es de extrañar que los germanos estuviesen claramente fuera de cualquier posibilidad frente a Red Bull y Ferrari, al menos en las primeras pruebas del Mundial [50].

Cabe destacar que se rumoreó tras esas primeras carreras que podría llegar a haber una correlación entre todos los equipos que utilizaban la unidad de potencia Mercedes y sus problemas derivados de *porpoising*. Mercedes, Aston Martin y Williams evidenciaron una clara escasez de carga aerodinámica en pista, siendo su rendimiento en las primeras carreras muy pobre. Estos tres monoplazas, a diferencia del resto, maximizaban la distancia entre los neumáticos delanteros y las entradas de aire en los laterales, lo cual teóricamente representaba una ventaja a nivel aerodinámico. La unidad de potencia Mercedes se caracterizaba por tener un envoltorio o cubierta de caja de cambios más corta que el resto, porque al estar más retrasadas las entradas de aire y con tal de respetar la distancia entre ejes reglamentaria, la cubierta se veía forzada a ser más corta. Sin embargo, otros equipos tenían una cubierta de caja de cambios más larga porque al empezar y acabar antes la forma de los “*sidepods*”, tenían más espacio detrás disponible para alargar dicha cubierta. De otra manera, estos equipos se caracterizaban visualmente por tener en vista de alzado una geometría semejante a una gota, mientras que los equipos que usan U.P Mercedes no [50].



Figura 61. Aston Martin (arriba) con radiadores más atrasados y ensanchamiento final más abrupto; Hass (abajo) con radiadores más adelantados y con forma de gota al disponer de más espacio. (Fuente: Formula 1)

Esta distribución de la caja de cambios por parte de Mercedes, Aston Martin y Williams podía llegar a afectar el rendimiento aerodinámico de estos por los siguientes motivos.

- La carrocería más amplia en el eje trasero (a diferencia de aquellos monoplazas con forma de gota) podría contribuir a más restricciones del flujo hacia el difusor. Es decir, al flujo le costaría llegar en buen estado a la parte superior del difusor haciendo que la parte inferior del suelo por debajo sea más propensa a romper o colapsar el efecto suelo.
- La corta cubierta de la caja de cambios podría llegar a situar el centro de gravedad en un punto más extraño en relación con el punto de colapso aerodinámico de los bajos del coche, induciendo potencialmente más de esta manera el rebote.

La página oficial de la Fórmula 1, en su programa de televisión *Tech Talk*, facilitó un interesante gráfico en formato de diagrama de cajas en la que se muestra el estudio de la amplitud del marsopeo en el Gran Premio de Australia, tercera cita del Mundial de 2022. Este diagrama es un método estandarizado para representar gráficamente a través de sus cuartiles y mediana la gran cantidad de valores de amplitud recogidos en ese fin de semana, aparte de los valores atípicos. Además, no solo eso, sino que se recogió en un gráfico la evolución de la aceleración vertical de los equipos a lo largo de esa misma carrera [55].

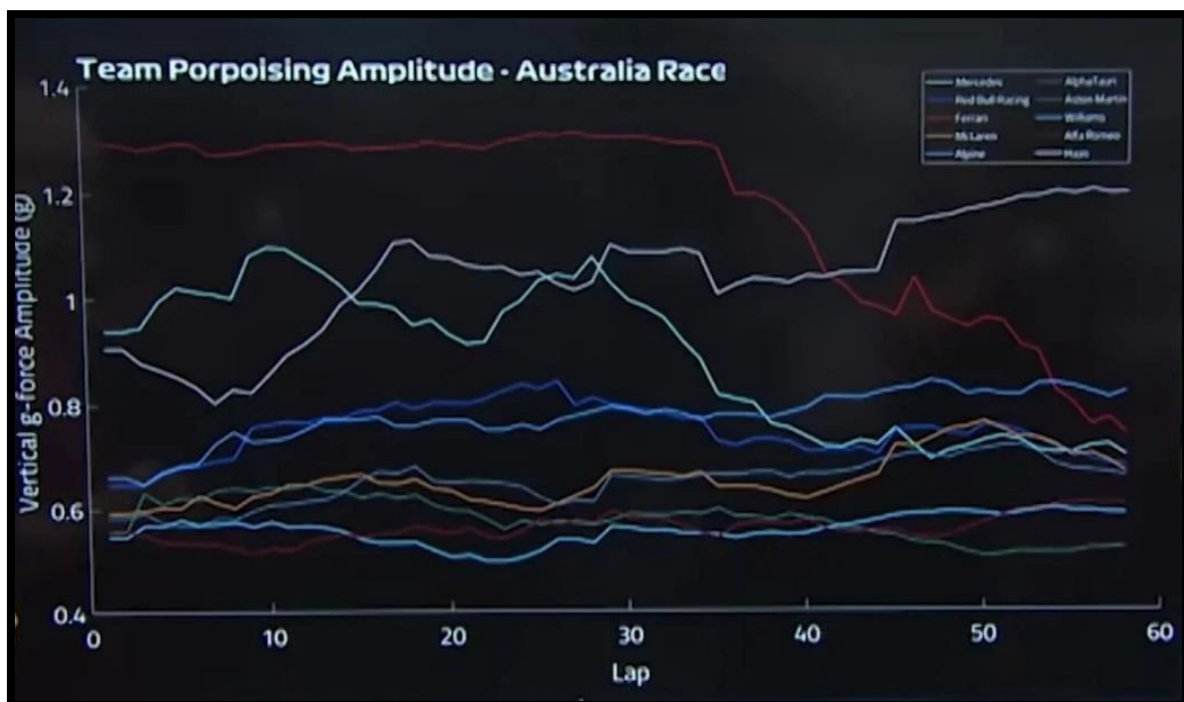


Figura 62. Gráfico de la evolución de la aceleración vertical de las 10 escuderías en el GP Australia 2022. (Fuente: Tech Talk F1)

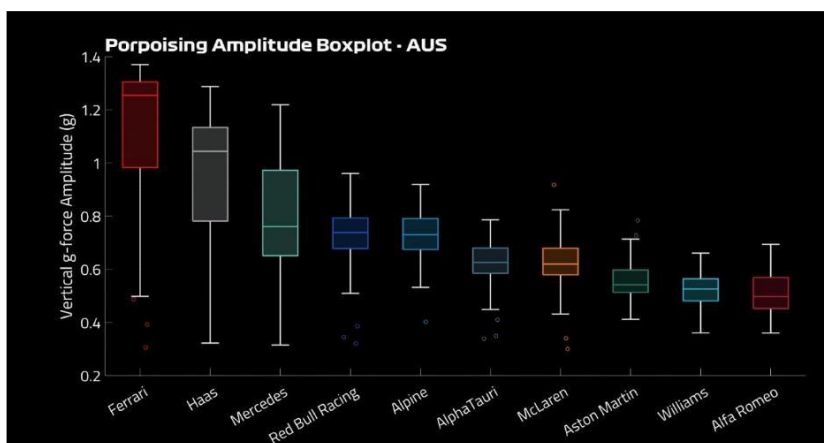


Figura 63. Diagrama de cajas reflejando los valores de aceleración vertical registrados por todas las escuderías en el GP Australia. (Fuente: Tech Talk F1)

Estos gráficos reflejan que Ferrari, Haas y Mercedes fueron los que sufrieron una mayor amplitud de rebote. Pero el dato realmente más relevante, es la variación en el *porpoising* que sufrieron estos tres equipos a lo largo de una carrera, y es por ello que sus respectivas cajas en el primer diagrama son más grandes que las del resto- y con gran diferencia. De esta manera, estos tres equipos presentaron una variación importante en su rebote en el transcurso de la carrera. Ferrari comenzó la carrera con unos valores muy altos de aceleración vertical y se mantuvo con unos valores constantes, y no fue hasta el último tercio de carrera cuando el rebote de la escudería italiana bajó sustancialmente y su rebote se estabilizó. Mercedes (color azul turquesa) tuvo una tendencia similar, pese a registrar más altibajos que Ferrari y pese a que sus valores de aceleración vertical no eran tan elevados, siendo la variación algo menor. Por su parte, el equipo *Haas* presentó unos valores similares a los de Mercedes, pero sorprendentemente, en vez de estabilizar más su rebote de cara a final de la carrera, este se agravó a medida que avanzaba esta. Posiblemente, una de las hipótesis es que esto se deba a que, a medida que transcurrían las vueltas, el coche tenía menos combustible, y, por lo tanto, iba cada vez siendo más ligero. De esta manera, la distribución de masas en el monoplaza variaría ligeramente comportando cambios sensibles en el balance aerodinámico del coche induciendo más o menos *porpoising*, según el *setup* o configuración inicial del monoplaza.

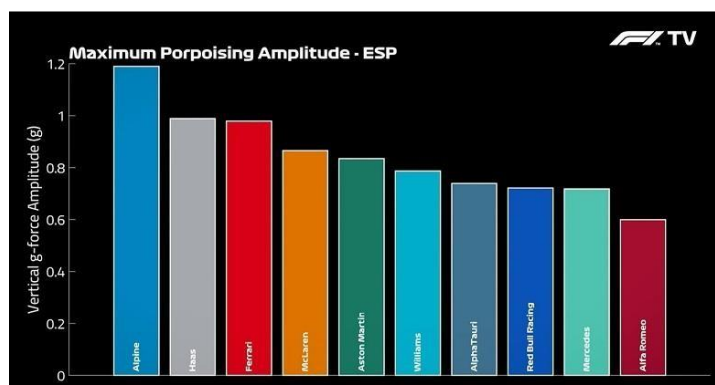


Figura 64. Gráfico de la aceleración vertical máxima registrada por cada equipo en el GP España 2022. (Fuente: Tech Talk F1)

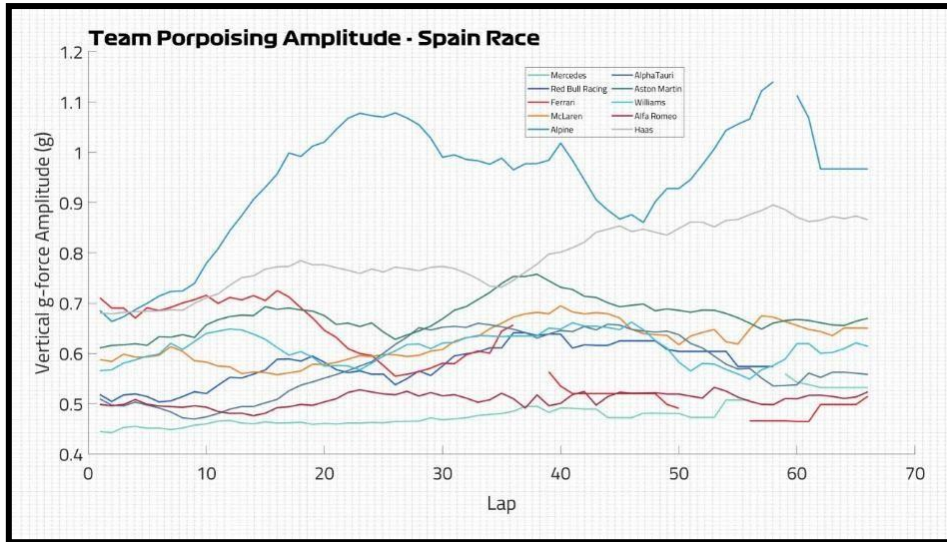


Figura 65. Gráfico de la evolución de la aceleración vertical de las 10 escuderías en el GP España 2022. (Fuente: Tech Talk F1)

En cambio, tres carreras después, en el Gran Premio de España en el circuito de Barcelona- Cataluña, los resultados fueron un tanto diferentes (Figura 64 y Figura 65). La misma Fórmula 1 aportó un gráfico en el que se mostraba la máxima aceleración vertical de todos los equipos en esa carrera, siendo Alpine el que más con 1,2 G, seguido de Haas y Ferrari (aun reportando ambos un rebote significativo) y con Mercedes aparentemente con unos valores bajos y prometedores. No obstante, se puede ver que los valores máximos en esta sexta carrera del campeonato fueron más bajos, significando que los equipos iban llevando mejor este problema. En el segundo gráfico, también la evolución del rebote a lo largo de esa carrera, el equipo Alpine evidenció altibajos inmensos reportando una alta variación de aceleraciones verticales, mientras que el rebote de Haas o Aston Martin evolucionaban a peor, y Mercedes apenas sufría rebote [55].

Así pues, Mercedes mostró una mejoría muy notoria en este Gran Premio y apenas mostró problemas como en los Grandes Premios pasados. Además, se comportó de manera muy competitiva siendo el primer Gran Premio de la temporada en el que mostraron ritmos similares a los de cabeza de carrera. No es de extrañar que este cambio de tendencia coincidiese con el nuevo paquete de mejoras del suelo que la escudería alemana implementó de cara a esta carrera para paliar el problema del rebote.



Figura 66. Mejoras en el suelo de Mercedes con perfil interior ligeramente más elevado que el exterior. (Fuente [51])

Según Matthew Sommerfield para Motorsport [60]: “Para España, el equipo revisó el diseño de los bordes del fondo, añadiendo una aleta con borde en forma de guadaña que está unida en tres puntos a lo largo de su longitud por soportes metálicos. La forma del suelo a lo largo del borde del alerón también se cambió para incorporarlo, con una sección elevada más pronunciada que es visible antes de que se mezcle con el diseño de la región del fondo que está delante del neumático trasero. Esto también ha sido modificado, pero no parece estar tan mejorado.”

Como se observa, la parte más interior del suelo presenta más elevación que la exterior, significando probablemente que el techo del suelo del fondo plano debajo es sensiblemente más alto en esa región en concreto y que presenta algunas modificaciones [51]. Además, la rampa de expansión del difusor se alargó ligeramente, siendo por lo tanto el coche en ese Gran Premio menos propenso a que el flujo colapsará cuando tuviese su altura de manejo más baja. Por lo tanto, ganaron rendimiento aerodinámico y también, al no sufrir marsopeo en la recta, mayor velocidad punta.

La imagen siguiente refleja un gráfico que compara el marsopeo registrado de las escuderías en los test de pretemporada en Barcelona y en el propio Gran Premio de España. Es decir, se analiza una comparativa de la evolución de cada escudería en un mismo escenario, el circuito de Barcelona-Cataluña, tomando en cuenta los test de febrero y la carrera en mayo de 2022. Como los anteriores, el gráfico fue facilitado por la página oficial de la Fórmula 1 [55].

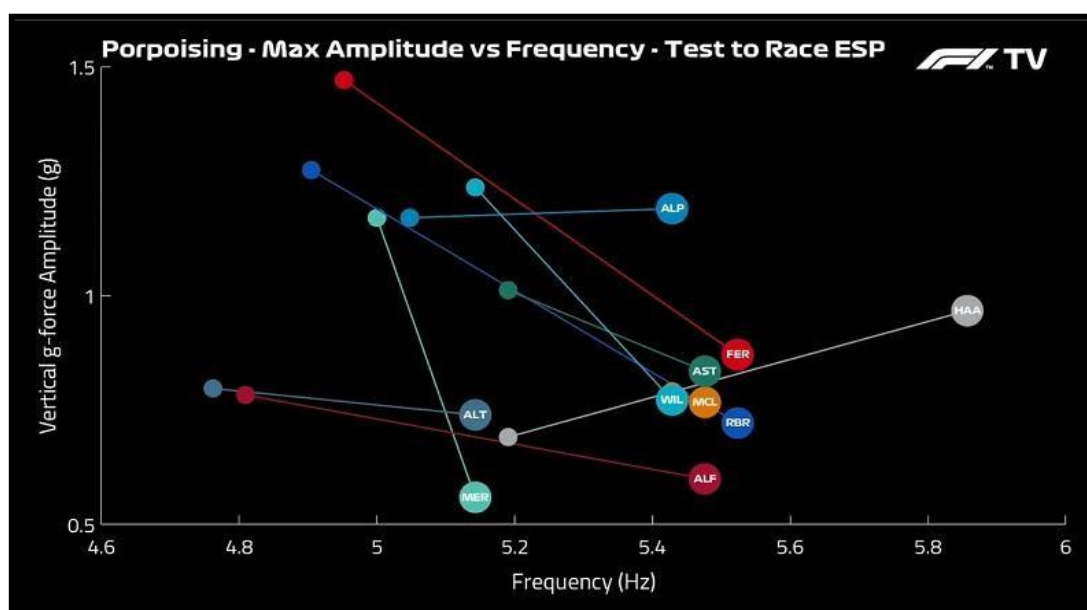


Figura 67. Comparación de la amplitud y la frecuencia del rebote de cada equipo en los test de pretemporada (febrero) y en el GP España 2022. (Fuente: Tech Talk F1)

Se observa el comportamiento del rebote de las diez escuderías en función de su amplitud y su frecuencia. Lo más destacado, es que a excepción de la escudería Alpine y sobre todo Hass, la mayoría de las escuderías mostraron una mejora evidente respecto a los test de pretemporada. Red Bull, Mercedes, Williams, Alpine y especialmente Ferrari, mostraron valores elevados de aceleración vertical en febrero (valores por encima de 1G). No obstante, se observa que dichas escuderías (menos Alpine), casi tres meses después,

consiguieron reducir estos valores notablemente, especialmente Mercedes, cuya mejora fue claramente la mayor.

Por otro lado, se puede ver que todos los equipos, independientemente de la evolución de la amplitud de sus rebotes, sufrieron un aumento de la frecuencia de estos, en mayor o menor medida. Es decir, lograron experimentar una amplitud de oscilación más reducida respecto a los test de febrero, pero a costa de más frecuencia, o sea, más ciclos por segundo. Hass, por ejemplo, es quien registró valores de frecuencia más elevados meses después, aparte de experimentar un aumento de la amplitud del rebote respecto a febrero de 2022. De esta manera, se puede concluir que Hass fue el equipo que peor mejora experimentó, y Mercedes la mejora más grande, ya que tres meses después reportó un descenso muy visible de la amplitud de su rebote con un negligible aumento de su frecuencia.

Estos fueron los datos reportados en el Gran Premio de España, carrera en la que la mayoría de las escuderías presentaron actualizaciones y nuevos paquetes de evoluciones en sus respectivos bólidos. Como se ha observado, la mejora de la mayoría de los equipos fue evidente respecto a los primeros test invernales, con lo que el marsopeo dejó de ser tan severo de ahí en adelante, a excepción de alguna carrera como el G.P Azerbaiyán, circuito urbano con rectas largas y bacheado. Tres carreras después de ese G.P España, la FIA comenzó a monitorizar las aceleraciones verticales de los equipos mediante los sensores acelerómetros que los monoplazas llevaban debajo del coche. Fue en ese momento cuando los equipos se vieron forzados a realizar las modificaciones necesarias en el *setup* del vehículo si no querían que la FIA interviniera en el asunto e ilegalizara el monoplaza.

6.3 CONSECUENCIAS Y RIESGOS EN LA SALUD

Pese a que todo el *paddock*, ingenieros, periodistas y aficionados se quedaron perplejos ante los rebotes que experimentaban los coches en esos primeros días de rodaje de los nuevos monoplazas de 2022, no es de extrañar que a quién pillaría más por sorpresa fuese a los pilotos mismos. Bajando la larga recta de 1km del circuito catalán experimentaban incómodos botes a una frecuencia de 5 Hz y una velocidad vertical fuera del rango de la comodidad. Continuaron los test en Bahrein semanas más tarde, y lejos de ser cosa de un día, se volvieron a reproducir los problemas allí. El marsopeo venía para quedarse y los pilotos tenían que hacerse la dura idea de tener que lidiar con esos rebotes durante nueve largos meses.

Son varias las consecuencias negativas del *porpoising* en lo que concierne al puro rendimiento del monoplaza. Entre ellas:

- **Potenciales daños en el fondo plano del monoplaza** si la aceleración vertical es alta. Además, la plancha de madera debajo del fondo plano puede sufrir un mayor y rápido desgaste fruto del rozamiento masivo contra el asfalto, comprometiendo de esta manera la legalidad del monoplaza al término de la carrera.

- **Superficie de huella de rodadura de los neumáticos discontinua** debido a las fuerzas verticales discontinuas que sufren los neumáticos, al comprimirse y expandirse el 3r muelle cíclicamente con más energía elástica [37]. Es decir, de esta manera, los neumáticos sufren sobre sí mismos una carga vertical discontinua yendo en línea recta.
- **Menor velocidad punta del monoplaza en recta.** En el momento en el que el monoplaza sufre la expansión de sus suspensiones y se levanta, es un punto en el que menor carga hacen los neumáticos sobre el asfalto, y por ello, el coche pierde ligeramente algo de tracción [37]. Así pues, ante este sensible cambio cíclico de la tracción de las ruedas traseras del monoplaza, a este último le costará más potencialmente adquirir una velocidad punta elevada en recta.

Sin embargo, las mayores consecuencias son sufridas por los pilotos, que al final del día son los encargados de manejar y pilotar estos vehículos de 1000 CV, a unas velocidades y aceleraciones centrífugas fuera del rango de lo tolerable para la mayoría de las personas comunes. Si a eso se le añaden aceleraciones verticales descomunales, la conducción de estos monoplazas por más de 300 km (la distancia media de un Gran Premio) se antoja una mera prueba de resistencia titánica.

Son varias las celebridades que manifestaron un claro malestar con la situación y el rebote experimentado. George Russell, piloto de Mercedes-Benz F1, acabó aturrido el Gran Premio de la Emilia Romagna en Imola pese a su gran rendimiento en esa prueba, consiguiendo una meritoria 4ta plaza [63]: *“Este es el primer fin de semana que realmente he estado sufriendo con mi espalda. Casi como dolores en el pecho por la gravedad del rebote, pero es justo lo que tenemos que hacer para conseguir los tiempos de vuelta más rápidos del coche.”* El piloto británico clamó contra la búsqueda de una solución rápida debido a la insostenibilidad que representaban estos rebotes, siendo esa aún la cuarta carrera de la temporada de 22 que tenían que disputar [63]: *“El rebote realmente te deja sin aliento. Es lo más extremo que he sentido nunca. Realmente espero que nosotros y el resto de los equipos que lo sufren encontremos una solución, porque no es sostenible para los pilotos continuar con este nivel de rebote”.*

Hay que recordar que Mercedes fue, junto a Ferrari, quién padeció más severamente las consecuencias del marsopeo. No es de extrañar que fuesen precisamente los dos pilotos de la escudería germana los que más molestos y disconformes estuviesen. Lewis Hamilton, al término del Gran Premio de Azerbaiyán, dejó unas imágenes que pasaron al recuerdo como un buen reflejo de cómo el rebote podría afectar a la salud de los pilotos. El piloto anglosajón se tomó un gran tiempo en salir de su *cockpit* por su propio pie, llegando a necesitar incluso ayuda para acabar de salir del habitáculo debido a los evidentes dolores de espalda que parecía padecer al acabar el Gran Premio. Fue este el detonante que provocó que la FIA comenzase a pensar en soluciones al respecto, proceso el cual se ha explicado en páginas anteriores.

Toto Wolff, jefe de equipo de la escudería Mercedes, salió en defensa en varias ocasiones de sus dos pilotos con tal de alzar la voz y dar visibilidad a este problema, cuyas consecuencias de salud parecían ser invisibles y poco relevantes hasta el Gran Premio de Bakú. Toto llegó a insinuar que Lewis tenía un potencial riesgo de sufrir daños cerebrales a largo plazo si no se hacía nada al respecto [62]: *“Todavía creo que la FIA y todos nosotros debemos hacer algo al respecto. Frecuencias de 1 a 2 Hertz que duran unos minutos pueden causar daño cerebral. Tenemos de 6 a 7 Hertz durante varias horas”.*



Figura 68. Lewis Hamilton padeciendo dolor de espalda al término del GP Azerbaiyán 2022. (Fuente: DAZN News)

Los problemas de columna vertical eran más que evidentes, aparte de un inconveniente añadido a la conducción, como era el hecho de tener una visión lo suficientemente aguda a 300 km/h para predecir el punto de frenada mientras se experimentaban rebotes de 1G de aceleración vertical a una frecuencia de 5 Hz. De esta manera, la conducción se antojaba más peligrosa al no ver los pilotos con claridad, ni la pista, ni mucho menos los diminutos retrovisores en sus laterales.

Carlos Sainz, piloto español de la escudería Ferrari, mostró claramente su malestar dejando entrever las posibles secuelas a largo plazo que probablemente padecerá, más aún si no se hacía nada al respecto. En la previa al Gran Premio de España exclamó [66]: *“En las pruebas de invierno, esta pista fue una locura, el ‘porpoising’ que tuvimos, por lo que será una gran referencia para saber dónde estamos. Creo que como pilotos y la Fórmula 1 debemos pensar, ¿cuánto debe pagar un piloto por su espalda y su salud en una carrera de Fórmula 1 con este tipo de filosofía de monoplace? Creo que es momento de abrir el debate más que nada”*. *“Creo que las regulaciones son excelentes. Están haciendo exactamente lo que necesitábamos para las carreras. Pero ¿necesitamos correr tan rígidos para el cuello y la espalda como lo hemos hecho últimamente?”*. Y concluyó con algo más preocupante y serio: *“Me he hecho mis controles habituales en la espalda, la tensión en el cuello, y veo que este año estoy más tensó en todas partes. No necesito el consejo de un experto para saber que 10 años como este van a ser difíciles y tendré que trabajar mucho en movilidad, flexibilidad e invertir en la salud general del cuerpo”*.

Pero no solo fueron los pilotos los que salieron ante la prensa a manifestar su disconformidad ante la situación. Fueron varios los médicos expertos quienes tuvieron que puntualizar las severas consecuencias en la salud de los pilotos que el marsopeo podría acabar ocasionando. El neurocirujano Pablo Clavel, especializado en columna y cráneo, dejó claro que el marsopeo es un movimiento que podría *“dar lugar a lesiones ligamentosas o discales cervicales con el tiempo”* [65]. Además, el neurocirujano español matizó que *“la columna se ve sometida a un estrés biomecánico excesivo, aunque reconoce que los pilotos cuentan con una musculatura cervical muy entrenada.”* No es de extrañar que creyese que los pilotos, en ese momento más que antes, debiesen seguir entrenando con intensidad su musculatura cervical y fortalecerla más [65]. Por suerte, hoy en día desde 2003, se utiliza el HANS, un dispositivo de seguridad en forma de collarín cervical posterior que protege la columna cervical y la cabeza del piloto ante abruptos latigazos que pueda sufrir su cuello

por movimientos dinámicos del coche como el cabeceo o aceleraciones longitudinales fuertes.



Figura 69. Carlos Sainz realizando entrenamientos de fortalecimiento de la musculatura cervical. (Fuente: Formula 1)

No solo Pablo Clavel, sino alguien más conocido en el nicho de la Fórmula 1, se sumó en su momento a criticar el efecto rebote. El eminente neurocirujano, y el que presidiera la comisión médica de la FIA desde finales de la década de los 70 hasta comienzos de los años 2000, Sid Watkins, vivió la época de los 80 en la que hubo los primeros coches con efecto suelo, y por ello, primeras evidencias de *porpoising*. El exmédico oficial de la F1 ya tuvo que atender en la década de los 80 a varios pilotos con dolores en la columna cervical debido especialmente a la alta rigidez de las suspensiones [64]: *“También las vibraciones son un problema. A menor amortiguamiento de la suspensión, más se expone el cuerpo del piloto a las vibraciones. La columna vertebral sufre cargas verticales a causa de los golpes del coche contra las irregularidades del asfalto. Esto comprime y descomprime los discos intervertebrales de la columna, que están constituidos por un material fibroso y elástico cuya misión es absorber los golpes. Al mismo tiempo, los músculos de la columna vertebral trabajan de forma activa para tratar de contrarrestar el efecto de la fuerza G y reducir al máximo el estiramiento y la compresión vertical de la columna.”*

Raymond Blancafort, en su artículo en *Soy Motor*, prosiguió [64]: *“Watkins añadió que las radiografías hechas a algunos pilotos de F1 mostraron que los problemas discales de la columna eran verticales, en lugar de los típicos problemas horizontales de las hernias discales y que las vibraciones y fuerzas G en el cuello llevaban a una alteración artrósica precoz, como se da en otros deportes tales como boxeo, fútbol o hípica”.*

Afortunadamente, tras el Gran Premio de Canadá en junio de 2022, la FIA tomó medidas y junto a la *Técnica Directiva 039*, monitorizó más resolutivamente el fenómeno y los pilotos dejaron de sufrir el problema en la misma escala en la que lo hicieron al inicio de temporada.

7 SIMULACIÓN CFD

Tras analizar la naturaleza aerodinámica del marsopeo e indicar los detonantes en el nuevo reglamento técnico que facilitaron el desencadenamiento del rebote en los monoplazas de 2022, se realizará un análisis práctico que corrobore la extrema sensibilidad de la carga aerodinámica a cambios milimétricos de la altura de manejo. Es decir, se evaluará la diferencia de rendimiento aerodinámico que un vehículo de 2022 puede potencialmente generar con diferentes alturas de manejo del eje trasero, quebradero que a la postre desencadena el rebote por querer llevar los coches demasiado bajos en busca del pico de rendimiento óptimo.

El CFD, o dinámica de fluidos computacional, es una herramienta informática utilizada para entender y predecir el comportamiento de un fluido en unas condiciones preestablecidas [69]. Mediante cálculos numéricos complejos, algoritmos matemáticos y ecuaciones de Navier-Stokes, se puede calcular en cada punto de dicho fluido sus propiedades gracias a este tipo de simulaciones. Estas ecuaciones, sin embargo, tienen una naturaleza no-lineal, por lo que, con tal de obtener resultados aproximados a la realidad planteada, es necesario definir un volumen de control finito (es decir, un dominio) para establecer nuevamente las ecuaciones en forma algebraica y poder resolverlas numéricamente [12].

Este tipo de herramienta se trata de un método de extracción de datos de rendimiento aerodinámico que cada vez ha ido cobrando más relevancia frente a simulaciones de túnel de viento, al no ser tan costoso y complejo de manejar que estas últimas. Ayuda a los ingenieros a adquirir una mayor comprensión y entendimiento de la aerodinámica de un prototipo diseñado.

Por este motivo, en las posteriores páginas, se empleará esta herramienta computacional con tal de evaluar el rendimiento aerodinámico de una especificación muy simplificada de un modelo de monoplaza de 2022 con diferentes alturas de manejo. De todos los *softwares* disponibles, se valoró entre utilizar *Open Foam* o *Simscale*. Teniendo en cuenta que esta simulación se pudo llevar a cabo con una máquina personal de 4 núcleos- es decir, con pobres recursos y potencia computacional en base a lo que el problema planteado demandaba-, que apenas se disponía de conocimientos y experiencia previa ejecutando simulaciones CFD, y que la geometría utilizada requiere un mallado computacionalmente muy costoso, se decidió utilizar *SimScale*. A continuación, se plantean ventajas y desventajas entre ambas plataformas que ayudaron a decantarse finalmente por *SimScale* en base a las necesidades y objetivos de la simulación llevada a cabo [12]:

	OPEN FOAM	SimScale
Núcleos disponibles	4	32
Memoria RAM (Gb)	8	64
Máquina física requerida	Sí	No
Conocimiento CFD requerido de base	Sí	Sí
Consumo de energía computacional	Sí	No
Soporte directo	No	Sí
Utilización de <i>solvers</i> de código abierto	Sí	Sí
Conexión a Internet necesaria	No	Sí
Horas computacionales permitidas	Ilimitadas	3000

Tabla 2. Ventajas (verde) y desventajas (rojo) de las características principales de OpenFOAM y SimScale. (Fuente [12])

7.1 SOFTWARE SIMSCALE

SimScale es una plataforma de ingeniería asistida por computadora (CAE) basada en la nube. SimScale fue desarrollado por SimScale GmbH y permite simulaciones estructurales, de fluidos y térmicas en la nube sin la necesidad de una poderosa herramienta de TIC. La plataforma basada en la nube de SimScale permite a los usuarios ejecutar más simulaciones y, a su vez, iterar otros cambios de diseño sobre los sistemas informáticos locales tradicionales [70].

Cómo se ha comentado, el módulo CFD de *SimScale* utiliza OpenFOAM para simulaciones de flujo de fluidos. Es posible el análisis del estado estacionario y transitorio para los siguientes casos: flujo laminar, flujo turbulento, flujo compresible, flujo multifásico, transporte de masa escalar, flujo de fluido alrededor de un cuerpo rígido, modelado avanzado, y el caso que se empleará para este proyecto, flujo incompresible.

El Plan Comunitario de SimScale se anunció el 2 de diciembre de 2015 basado en una nueva ronda de inversiones liderada por *Union Square Ventures* (USV). El plan comunitario es gratuito e incluye 3000 horas de computación y 500 GB de almacenamiento por año para cualquier usuario registrado. Las simulaciones / proyectos creados por un usuario registrado en el "plan de la comunidad" están disponibles para el acceso de todos los demás usuarios en los proyectos públicos de *SimScale*, una especie de biblioteca de proyectos de simulación donde todos los usuarios registrados pueden usar estos proyectos como un modelo de simulación existente [70].



Figura 70. Logo de SimScale. (Fuente [70])

7.2 PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

7.2.1 PREPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Uno de los condicionantes más relevantes en la búsqueda de resultados muy precisos y lo más representativos posibles es la calidad de la geometría. Una mala geometría del CAD exportado al *software* de simulación es precursora de un mallado deficiente y defectuoso que devalúa mucho la ejecución de la posterior simulación y los resultados obtenidos. En definitiva, es importante buscar el balance entre dar con una geometría lo más próxima y parecida a la realidad posible, pero simultáneamente, simplificándola y adaptándola hasta el punto en el que la simulación pueda ejecutarse decentemente y la calidad de la malla sea la más óptima posible.

Utilizando la biblioteca de proyectos públicos de SimScale se obtuvo una geometría CAD de un monoplaza de F1 2022, la geometría del cual es extremadamente minimalista, primitiva y simplificada, lejos de ser la representación más precisa y similar al coche de 2022- tan solo tiene 355 caras. Como se observa en la Figura 71, el alerón delantero apenas tiene aletines, y la geometría de las suspensiones y del fondo plano son lejos de ser detalladas. Se intentó trabajar con otros modelos CAD más elaborados y detallados descargados de librerías públicas online de modelos CAD, pero las geometrías no eran las más adecuadas y lejos de ser adaptables a entornos de simulación CFD. Además, y cómo se ha especificado en el alcance de esta memoria, el modelado de un monoplaza de 2022 va más allá de este al no disponerse del tiempo suficiente y no ser ese uno de los objetivos estipulados para este proyecto. Es por este motivo que se asume que los resultados a obtener van a estar considerablemente lejos de la realidad planteada, pero por otra banda, la calidad de la malla y consecuentemente de la simulación, no se verán comprometidas. No obstante, hubo la iniciativa de limpiar la geometría de elementos diminutos complejos, de fusionar superficies solapadas, de suavizar superficies con cantos y bordes agudos.

Con tal de facilitar la orientación de la geometría en la plataforma de simulación se cambió el centro del sistema de coordenadas; x se definió en la mitad de la distancia entre ruedas, y en el plano de simetría, y z en el plano del suelo. Por último, el sólido, trabajado en SolidWorks, fue exportado en formato *Parasolid (.x_t)*, formato apropiado para importar sin complicaciones el sólido en *SimScale*. Por último, hay que mencionar que la altura de manejo del eje trasero es de **112 mm**, es decir, la distancia entre el suelo y el asfalto.

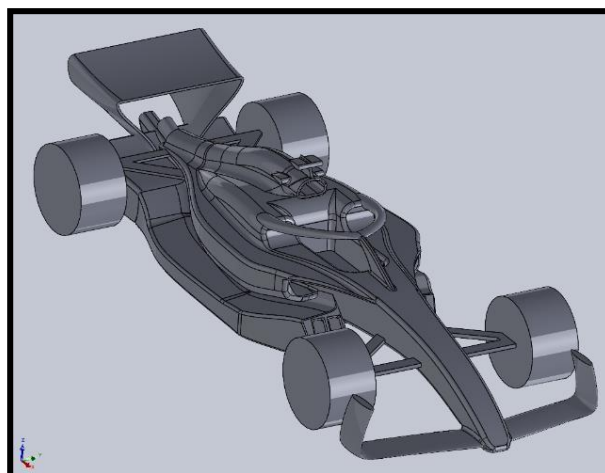


Figura 71. Modelo CAD de monoplaza de F1 2022 empleado para simular.

7.2.2 DEFINICIÓN DEL DOMINIO DE FLUJO

Una vez importado el sólido al entorno de SimScale, es necesario crear una región o volumen de control externo, dentro del cual se ubique este. Este volumen de control es similar a una caja, cuyos límites a ser establecidos, definen los límites del flujo con el cual se lleva a cabo esta simulación de flujo incompresible. Este flujo rodea completamente la geometría y todo lo que vaya más allá de esos límites, no afecta en absoluto al devenir de la simulación.

Las dimensiones de estos límites van en función de la longitud de referencia del sólido a simular. Esta es definida con la variable “ L ”, es igual a 5,1 metros (se redondea a 5) y representa la longitud desde la punta del alerón delantero al borde más trasero del alerón trasero. Por otra parte, solo se incluirá dentro del dominio la mitad del sólido, ya que el monoplaza es simétrico, por lo que solo se simulará una mitad de la geometría. De esta manera, se ahorran muchos recursos computacionales y tiempo de simulación, pese a que, a la hora de analizar los resultados, las fuerzas y presiones estarán divididas a la mitad.

En base a otras simulaciones estudiadas de flujos externos incompresibles, y a recomendaciones de guías y tutoriales, las siguientes dimensiones son establecidas para definir la región límite del fluido [75]:

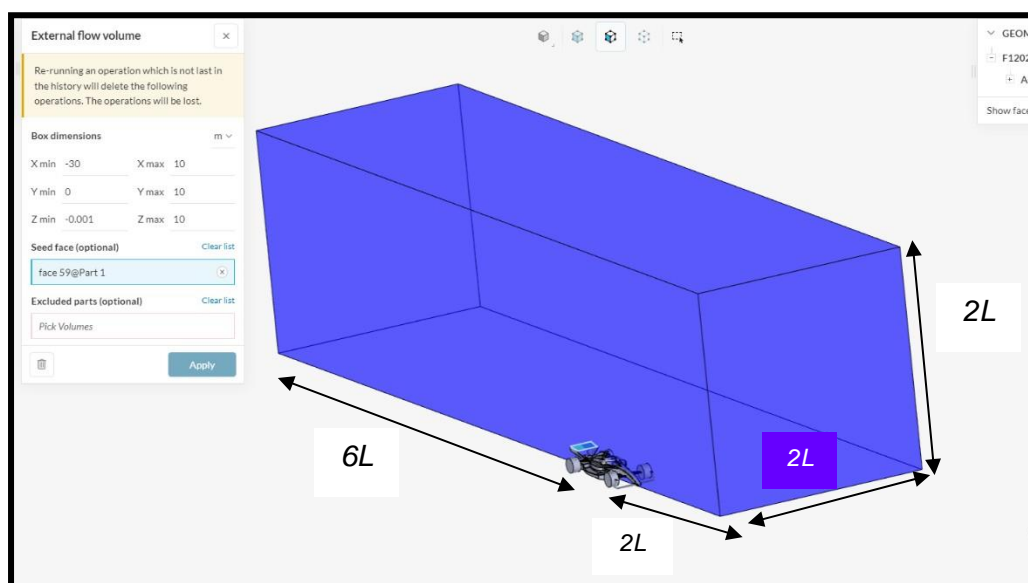


Figura 72. Dimensiones definidas de los límites de la región de flujo.

Como se observa, el volumen de flujo en la parte trasera del monoplaza es suficientemente amplio (30 m)- pese a poder serlo más-, con tal de captar bien la estela de aire que deja a su paso el coche y que esta no interfiera con los límites de la región. Este dominio del flujo adopta la forma del sólido a ser estudiado, y por ello, se elimina el sólido de este volumen de flujo quedando solo la forma exterior de este, y con ello, una superficie hueca dentro del dominio, con forma de la geometría estudiada.

7.2.3 PARÁMETROS GENERALES DE LA SIMULACIÓN

7.2.3.1 TIPO DE ANÁLISIS Y MATERIAL

El tipo de simulación que se llevará a cabo es un análisis de flujo de fluido **incompresible**. Esto es debido a que el flujo que se quiere estudiar, en este caso el **aire**, presenta una variación de densidad prácticamente nula a lo largo del tiempo. Como se ha comentado en 2.1.4, el número de Mach cuando el fluido adquiere una velocidad de 340 km/h (velocidad máxima aproximada que suele adquirir un Fórmula 1), es inferior a 0.3, con lo que, en este régimen, el fluido jamás experimenta variaciones de su densidad. Además, esta suposición es válida cuando los gradientes de velocidad y temperatura son pequeños, ósea, la divergencia de la velocidad de flujo es, matemáticamente hablando, 0.

Por otra parte, las propiedades del aire, mediante las cuales se obtiene el número de Reynolds, son las dadas ya por el programa en condiciones ambientales normales a 20°C: una densidad de **1,196 kg/m³**, y una viscosidad cinemática de **1,529e-5 m²/s**.

7.2.3.2 MODELO DE TURBULENCIA

Hoy en día, la mayoría de las aplicaciones ingenieriles emplean modelos de turbulencia al ser la mayoría de los casos estudiados en régimen turbulento. Cuando surge la turbulencia, aparecen consecuentemente otros fenómenos en el flujo, como disipación de la energía, mezcla del flujo, transferencia de calor y resistencia al avance inducida por ello, características negativas de cara a los parámetros de simulación si el modelo de turbulencia no está presente. Entonces, los modelos de turbulencia son modelos utilizados para predecir y reconstruir las propiedades y efectos de un flujo que entra en régimen turbulento.

El modelo de turbulencia más común en aplicaciones CFD son los modelos con base RANS, que pertenecen a la familia de modelos promediados de Reynolds en las ecuaciones de Navier-Stokes, y en la que todos los efectos turbulentos son modelados. Los modelos RANS que proporciona *SimScale* son K-épsilon, K-omega y **K-omega SST**, siendo este último el modelo usado en esta simulación. SST proviene de *Shear Stress Transport* (Transporte de tensión de cizalladura). K-omega es un modelo basado en 2 ecuaciones, donde aparte de las ecuaciones de conservación, resuelve dos ecuaciones de transporte. Las dos variables de transporte son la **energía cinética turbulenta k** y la ratio de **disipación turbulenta específica ω** , que determina la ratio de disipación por unidad de energía cinética turbulenta.

Simplificadamente, k-omega SST, es un modelo de turbulencia que combina tanto el modelo k-épsilon como el k-omega. El primero es ideal para flujos incompresibles con un número *Re* alto y sin sufrir cizalla, con gradientes de presión adversos muy pequeños. Es por este motivo, que, en condiciones de corriente de flujo, el modelo SST emplea un modelo de k-épsilon, evitando el inconveniente de k-omega de ser sensible a las propiedades de turbulencia de la corriente de flujo en la cara de entrada al volumen de control. Por otra parte, SST provee una predicción mucho más precisa y detallada de las separaciones del flujo y detecta mucho mejor el transporte de la tensión de cizalla en capas límite con gradientes de presión adversos. No obstante, alguna de las desventajas de este modelo es que produce niveles altos de turbulencia en regiones con mucha tensión o presión normal a la superficie.

7.2.3.3 DEPENDENCIA DEL TIEMPO

Hay dos variantes de simulación: simulación estacionaria y simulación transitoria. La estacionaria es una simulación atemporal, es decir, se adquiere la convergencia independientemente del tiempo, ya que las ecuaciones resueltas no cuentan de derivadas respecto al tiempo. Son computacionalmente menos demandantes y los resultados son obtenidos una vez se adquiere la convergencia de los valores estudiados, siempre que el número de iteraciones para ello este dentro del tiempo total de simulación.

Sin embargo, esta simulación se llevará a cabo en régimen **transitorio**. Son simulaciones en las que las variables asociadas al flujo varían a lo largo de un tiempo establecido. Por lo tanto, el tiempo total representa el transcurso de tiempo en el que los efectos transitorios necesitan ser analizados. En simulaciones transitorias, un valor de delta t dado (el salto incremental en el tiempo en el cual las ecuaciones transitorias son resueltas durante la ejecución de la simulación), se asume que ha convergido si los valores residuales caen por debajo de un valor dado.

Pese a que son simulaciones que demandan más recursos computacionales y son más exigentes y costosas, en este caso es necesario aplicar un régimen transitorio. Se quiere evaluar la variación de las fuerzas aerodinámicas, sus coeficientes y variables asociadas al flujo a lo largo de un tiempo predefinido- unos 2 segundos. De esta manera, se puede observar como a una velocidad de flujo dada, la carga aerodinámica del sólido simulado varía en el tiempo, dando a entender consecuentemente que la altura de manejo también varía y se reduce, pese a que la geometría sea estática.

7.2.3.4 ALGORITMO

Para esta simulación transitoria, el algoritmo usado para resolver las ecuaciones del modelo RANS es el **solver PIMPLE**, un algoritmo híbrido simple-piso muy común en SimScale para simulaciones transitorias turbulentas que permite números de Courant mayores de 1. Mediante este *solver*, se puede modificar los factores de relajación de los campos de presión y velocidad, y evitar así que estos últimos diverjan al procesarse la simulación.

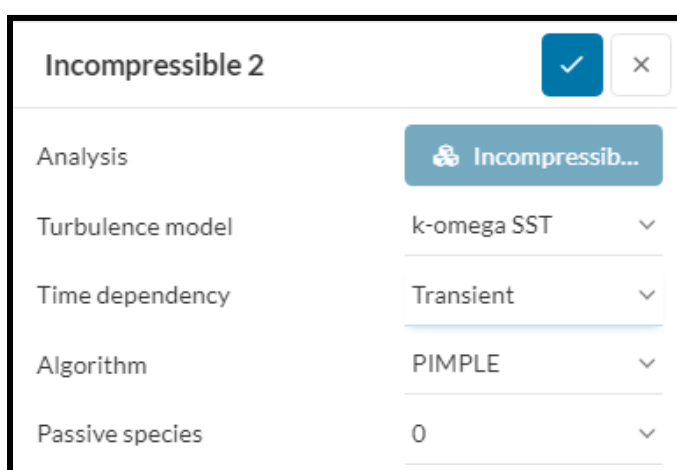


Figura 73. Parámetros globales definidos de la simulación.

7.2.4 CONDICIONES INICIALES

Los siguientes valores de condiciones iniciales son establecidos por defecto por SimScale:

- Energía cinética turbulenta (k) \rightarrow 0,00375 m²/s²
- Ratio específica de disipación (ω) \rightarrow 3,375 1/s

7.2.5 CONDICIONES DE CONTORNO

Para establecer las condiciones de contorno, SimScale proporciona diferentes tipos de análisis dependiendo de la simulación que se quiera estudiar. En el caso que atañe este proyecto, las condiciones de contorno son las siguientes:

7.2.5.1 ENTRADA

En la cara de entrada del volumen de control, por la cual incide el flujo entrante de aire, el único parámetro a modificar es la velocidad de entrada. Esta velocidad representa la velocidad relativa entre el flujo de corriente y el sólido, y es definida como un valor fijo de -60 m/s (-216 km/h) en el eje X, mientras que en los ejes Y y Z es 0.

7.2.5.2 SALIDA

La cara de salida, por la cual sale la corriente de flujo al final del volumen de control, tiene como único componente a definir la presión de salida, un valor fijo a 0 Pa, que recrea la presión atmosférica real en la parte trasera. Esta es la condición de contorno más característica a la salida de una región de contorno de flujo, y es comúnmente conocida como la condición de contorno de *zero de Dirichlet*. Esta condición establece que, para la solución homogénea de las ecuaciones diferenciales aplicadas a los nodos de contorno, todo lo que cruce ese límite de contorno desaparece, es decir, el fluido tendrá velocidad cero. Por este motivo, y para cumplir esa condición, la presión de salida es 0 Pa.

7.2.5.3 SIMETRIA

Esta condición establece que una de las caras laterales (perpendiculares al eje Y), es un plano simétrico que indica al dominio que está reflejado, al usarse solo una mitad simétrica.

7.2.5.4 PARED DESLIZANTE

La cara superior del dominio y la segunda cara lateral- la otra es el plano simétrico-, son consideradas como condición de contorno "Pared" y se establece que la velocidad en dichas paredes tiene condición de deslizamiento. Es decir, el flujo no es afectado por sus fuerzas viscosas cuando entra en contacto con los límites de contorno.

7.2.5.5 PARED MÓVIL

Esta cara refleja el suelo por el cual el sólido rueda a una velocidad relativa de 60 m/s. Como el sólido está estacionario y no se mueve, es el propio suelo el que se mueve a la velocidad a la cual circularía el monoplaza en la realidad. Es por este motivo, que los parámetros de contorno de esta cara serán iguales que las de la cara de entrada, estableciendo un valor de fijo de velocidad en el sentido negativo del eje x de -60 m/s.

7.2.5.6 PARED NO DESLIZANTE

Se establece a todas las caras del cuerpo del monoplaza, excepto a los neumáticos, una condición de contorno de pared, pero en este caso con condición de no-deslizamiento. Es decir, en la superficie del sólido se hallan subcapas límites y habrá un gradiente de velocidades fruto de las fuerzas viscosas del fluido.

7.2.5.7 PARED ROTATORIA

Si para el cuerpo del monoplaza se establece una condición de contorno de pared no-deslizante, para los neumáticos izquierdos delantero y trasero (los derechos pertenecen a la mitad de sólido simétrico fuera del dominio), se establece una condición de contorno de pared rotatoria. Se define para ello las coordenadas del centro de masas de cada neumático (datos extraídos de SolidWorks), su eje de rotación (+1 en Y; 0 en X,Z) y se define un valor fijo de velocidad de rotación (ω) de 183 rad/s. Teniendo en cuenta que esta última variable es el cociente de velocidad lineal entre radio de curvatura, v es 60 m/s, y el radio del neumático- extraído de SolidWorks- es de 0,328 m. Añadir que previamente se crean entidades topológicas del cuerpo (*body*), neumático delantero izquierdo (*front wheel*) y neumático trasero izquierdo (*rear wheel*), con tal de asignar más fácilmente las caras de las condiciones de contorno de la pared no-deslizante y pared rotatoria.

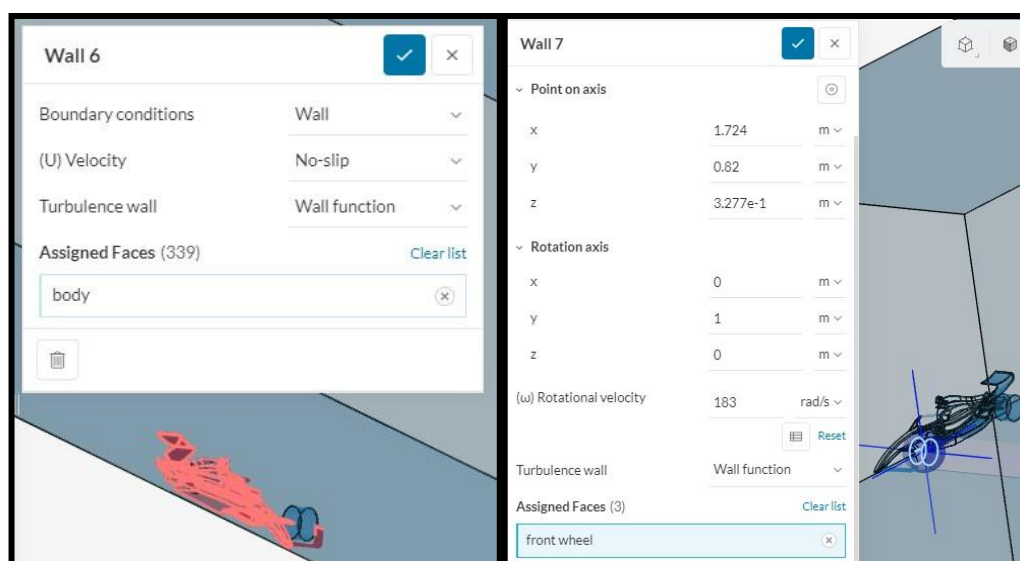


Figura 74. Condición de contorno pared con condición de no deslizamiento en el cuerpo del coche (izquierda); condición de contorno de pared rotatoria neumático delantero (derecha).

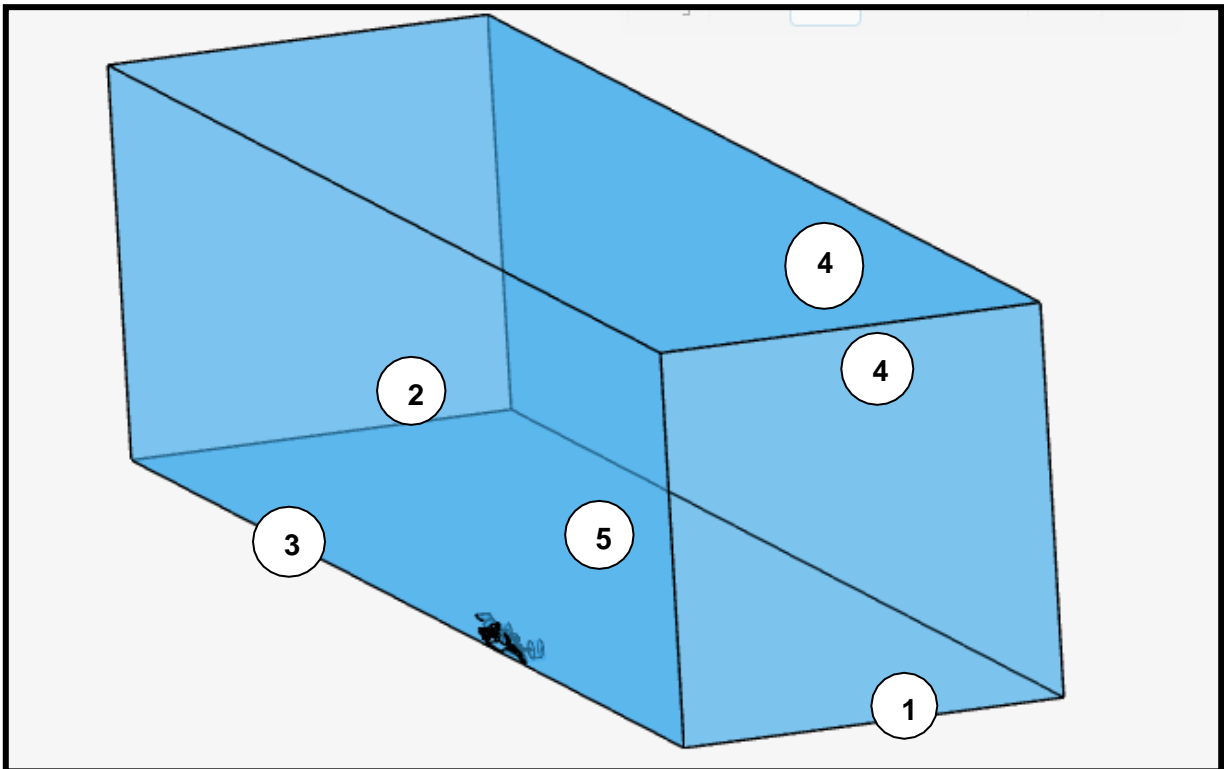


Figura 74. 1-Cara de velocitat d'entrada; 2- Cara de pressió de sortida; 3- Cara amb condició de simetria; 4- Paredes amb condició de desllizament; 5- Paret mòbil.

7.2.6 CONCEPTOS NUMÉRICOS Y CONTROL DE LA SIMULACIÓN

En lo que concierne a parámetros numéricos, la presión es calculada con el algoritmo GAMG, mientras que la velocidad, la energía cinética turbulenta y la ratio específica de disipación con el algoritmo *SmoothSolver*, que provee resultados más sólidos y robustos. Por lo demás, no se modifica el resto de los parámetros y variables, las cuales ya vienen por defecto del programa. No obstante, es recomendable disminuir el valor absoluto de la tolerancia (ω) a $10e-8$, ya que se es visto que sus residuos llegan a alcanzar esos valores.

Por otra parte, en cuanto a las variables que controlan la simulación, pese a que no afectan sustancialmente a la calidad de esta, sí que hay variables importantes que sirven para optimizar recursos y el desarrollo de esta. Al ser una simulación transitoria, en vez de definir un tiempo total de simulación, y con ello, un número total de iteraciones es definido un tiempo final. Es decir, la simulación no finaliza pasado X número de iteraciones preestablecidas, sino al finalizar el transcurso de tiempo en el cual se quiere estudiar la variación de las variables, en este caso, 2 segundos. Se cree que 2 segundos es un valor razonable, pese a que pueda comportar mucho tiempo computacional y cueste más ejecutar la simulación. Por lo demás, delta t está definido en 0.005 segundos, con lo que dividiendo el tiempo final 2s entre el delta t, da un total de 400 iteraciones, que debería ser suficiente para conseguir la convergencia de los residuos. El número de procesadores es de 32 núcleos, y el tiempo máximo permitido de ejecución de la simulación es de 30000 segundos, suficiente tiempo para finalizarla.

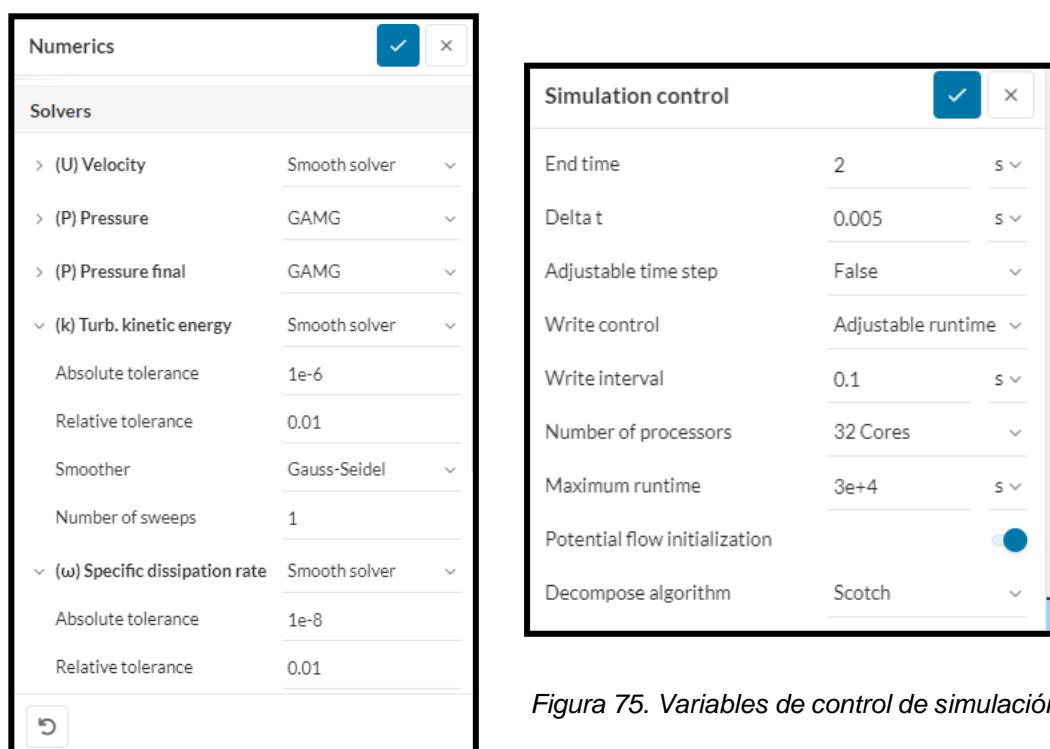


Figura 75. Variables de control de simulación.

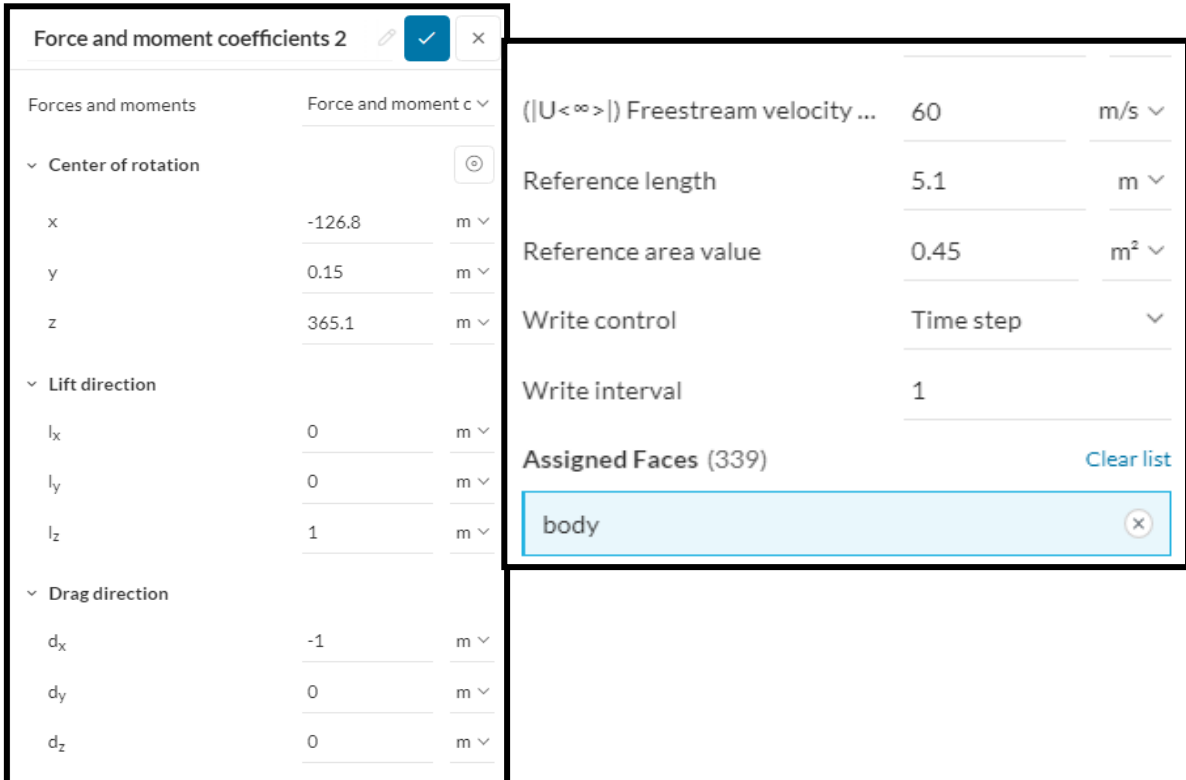
Figura 76. Controles numéricos de la simulación.

7.2.7 CONTROL DE RESULTADOS

Los siguientes parámetros permiten definir las variables o campos cuyos datos se quieren extraer y evaluar al término de la simulación en el post-procesamiento de esta. SimScale ofrece una serie de variables y estos son incorporados para estudiar.

En primer lugar, son definidas las fuerza y momentos, mediante las cuales pueden ser extraídos datos de las presiones, fuerzas viscosas y porosas, además de momentos de todas las partes del sólido simulado. No solo eso, sino también como es natural en este tipo de simulaciones aerodinámicas, coeficientes de sustentación y de resistencia al avance. Para calcular estos, es necesario definir algunas variables de las ecuaciones 1.3 y 1.4. Es decir, se inserta el centro de rotación del sólido (dato dado por SolidWorks), coordenadas de la dirección de la fuerza de sustentación (+1 en el eje vertical) y de la fuerza de resistencia al avance (-1 en el sentido opuesto del eje de movimiento longitudinal del coche). Además, se define el valor de la velocidad de la corriente de flujo (60 m/s), el área frontal proyectada de la mitad del sólido (0,45 m²), la longitud de referencia L de la geometría (5,1 m) y se asigna todas las caras de la geometría, exceptuando las ruedas.

En segundo lugar, se definen todos los cálculos de campo cuyos datos de post-procesamiento se quieren recoger al final de la simulación. En el caso que atañe la simulación llevada a cabo, son activados los campos de presión, el campo de vórtices, y especialmente las turbulencias, con cuyos datos se puede evaluar la distribución del grosor de la primera capa de flujo y^+ a lo largo de la superficie del sólido.



Force and moment coefficients 2		
Forces and moments		
Force and moment c		
Center of rotation		
x	-126.8	m
y	0.15	m
z	365.1	m
Lift direction		
l_x	0	m
l_y	0	m
l_z	1	m
Drag direction		
d_x	-1	m
d_y	0	m
d_z	0	m
((U<math>\infty>)) Freestream velocity ...		60 m/s
Reference length		5.1 m
Reference area value		0.45 m ²
Write control		Time step
Write interval		1
Assigned Faces (339)		Clear list
body		

Figura 77. Datos definidos para extraer los coeficientes de fuerza y momentos del sólido tras la simulación.

7.3 SIMULACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE REFERENCIA

La primera geometría simulada, la de referencia, es el prototipo original obtenido de la librería de proyectos públicos de SimScale. Lo más relevante y diferenciador respecto a la segunda simulación es que el suelo está levantado en la parte más posterior **112 mm**, y en la parte más delantera **63 mm**. A continuación, se detalla el proceso de mallado llevado a cabo, y los resultados obtenidos tras el procesamiento de la simulación.

7.3.1 PROCESO DE MALLADO

El modo de malla que teóricamente iba a ser seleccionado era el algoritmo de malla estándar de SimScale, ya que es el recomendado por defecto y utiliza un mallador de volumen finito. Sin embargo, tras múltiples problemas en cuanto a la calidad de esta y de divergencia de los campos de presión y velocidad al ejecutar la simulación, se decidió emplear el algoritmo de mallado **Hex-Dominant** [76]. Es un mallador basado en SnappyHexMesh, herramienta de mallado propia de OpenFoam. Genera teóricamente mallas híbridas desestructuradas en tres dimensiones y conformadas por elementos tetraédricos y hexaédricos.

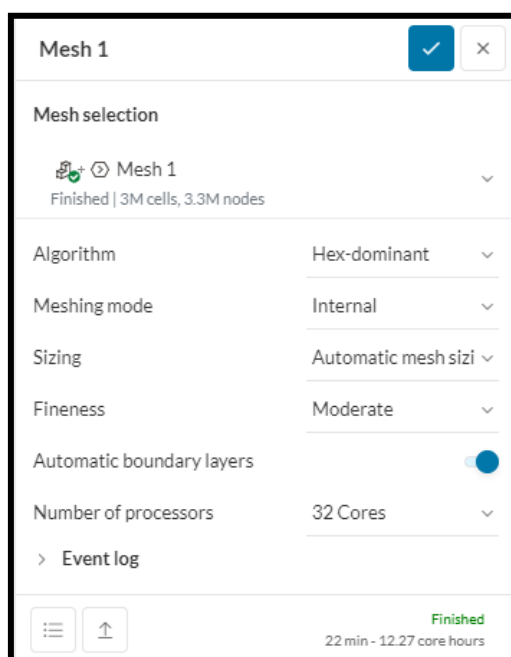


Figura 78. Parámetros de la malla seleccionada.

La malla Hex-Dominant automática reduce el parámetro establecido en la operación paramétrica Hex-Dominant a un mínimo y establece el resto automáticamente basado en el dominio del CAD [76]. En cuanto al modo de mallado, es seleccionado el modo interno para ubicar la malla en el interior de la región de volumen de control. La talla define como de grueso o fino es la discretización de la geometría importada, y al ser establecida a **automática**, las propiedades locales son ajustadas automáticamente en relación a estimaciones geométricas. Por ello, con el tamaño automático de malla, al seleccionar una finura concreta de mallado (en este caso **moderado** ya proporciona valores precisos), el resto de parámetros son automáticamente establecidos en relación con las características de la geometría y del mallado moderado. Se activan capas límites automáticas y se inserta el número de procesadores máximos que SimScale ofrece en su plan académico.

7.3.1.1 REFINAMIENTOS

A la hora de mallar es de suma importancia capturar todos los detalles geométricos, especialmente mallar bien aquellas regiones donde efectos físicos necesitan ser óptimamente simulados, como los bajos del coche o el área del difusor. Por este motivo, se necesita aplicar refinamientos a la malla en según qué áreas.

El primer refinamiento es llamado “caja grande” y busca recoger, no solo la geometría, sino la estela de flujo que deja a su paso con gran precisión y detalle. Las coordenadas que se ven en la siguiente ilustración son en relación al centro de coordenadas del CAD importado. El refinamiento de esta pequeña región se le provee un valor de máxima longitud de arista de 0,1 m, es decir, la celda en esa región adquiere como mucho un valor de 10 cm.

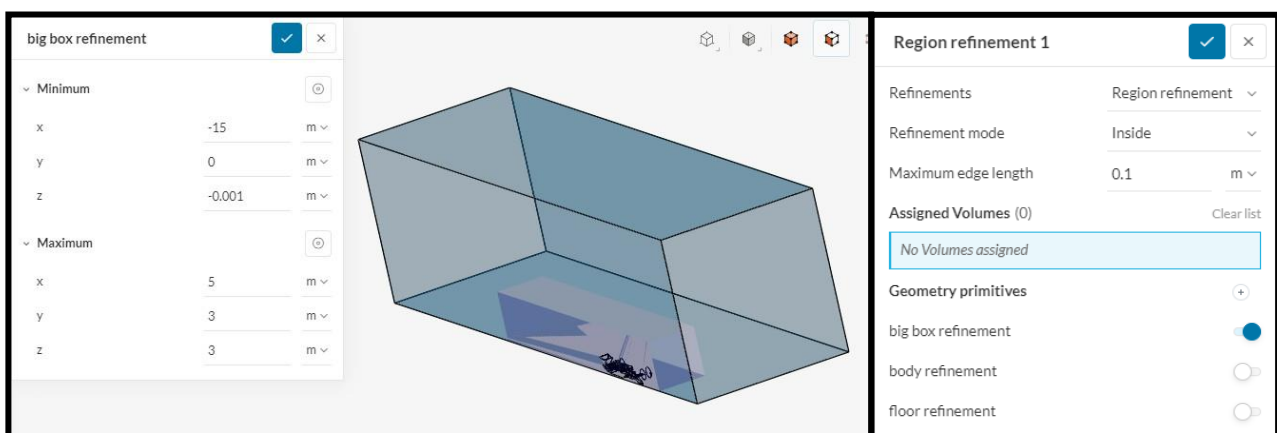


Figura 79. Izquierda: coordenadas del refinamiento de la caja grande. Derecha: parámetros de refinamiento de la caja grande.

El segundo refinamiento, llamado “refinamiento de cuerpo”, comprende principalmente solo la geometría del sólido y busca refinar la malla en la región más cercana a la superficie del coche para capturar mejor los gradientes de presión y velocidad. El refinamiento de esta pequeña región se le provee un valor de máxima longitud de arista de 0,05 m, es decir, la celda en esa región adquiere como mucho un valor de 5 cm.

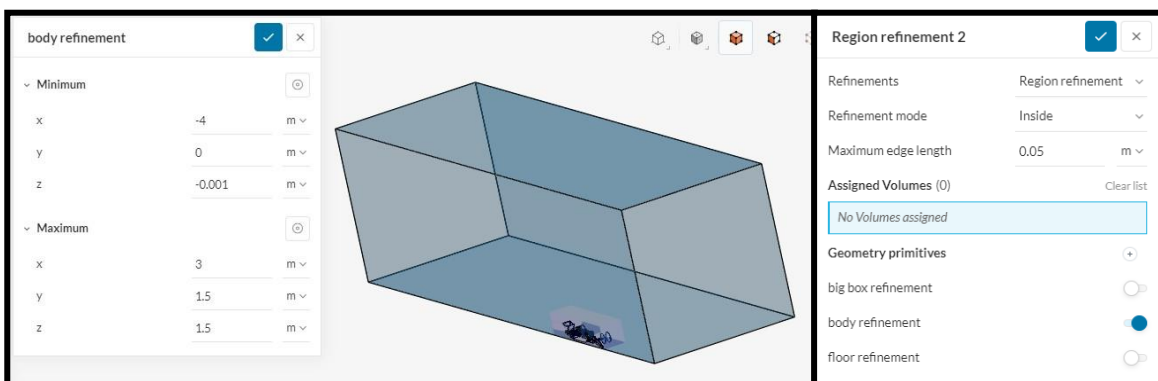


Figura 80. Izquierda: coordenadas del refinamiento de cuerpo. Derecha: parámetros de refinamiento de cuerpo.

El último refinamiento, llamado “refinamiento de suelo”, engloba solo el área debajo del fondo plano del coche y parte posterior de este con tal de capturar con detalle los efectos del flujo y sus propiedades en áreas delicadas de mayor generación de carga aerodinámica. El refinamiento de esta pequeña región se le provee un valor de máxima longitud de arista de 0,05 m, es decir, la celda en esa región adquiere como mucho un valor de 5 cm.

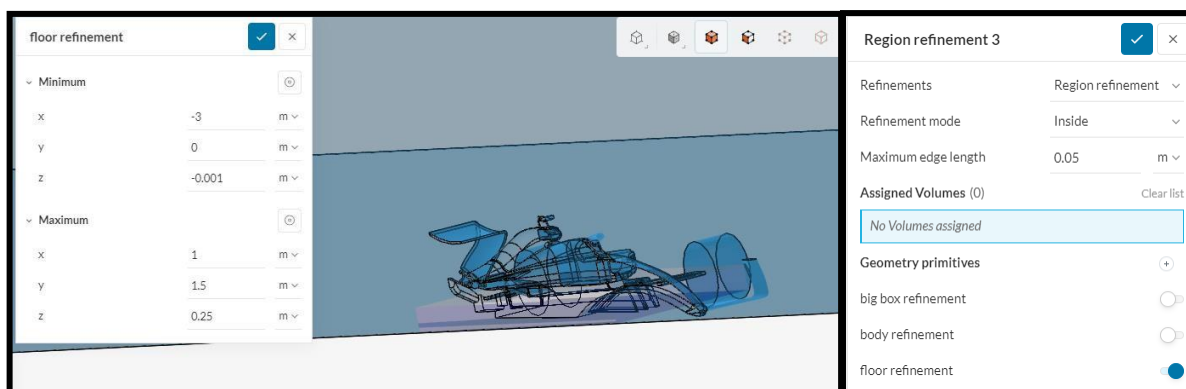


Figura 81. Izquierda: coordenadas del refinamiento del suelo. Derecha: parámetros de refinamiento del suelo.

7.3.1.2 RESULTADOS DE LAS MÉTRICAS DE CALIDAD DE MALLA I

Una vez aplicados todos los refinamientos correspondientes y de asegurarse que todas las regiones delicadas son correctamente tratadas, la malla es generada mediante su algoritmo mallador seleccionado. Tras 21 minutos y una consumición de 11,73 horas computacionales, es formada una malla de 3 millones de celdas y 3,2 millones de nodos.

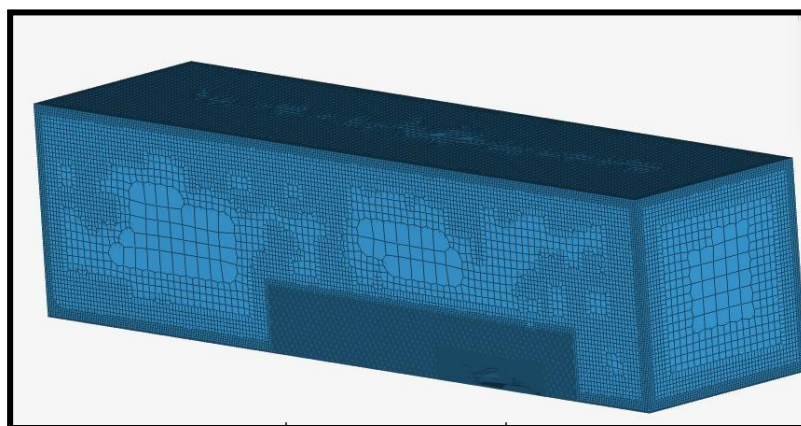


Figura 82. Aspecto general del mallado del dominio I.

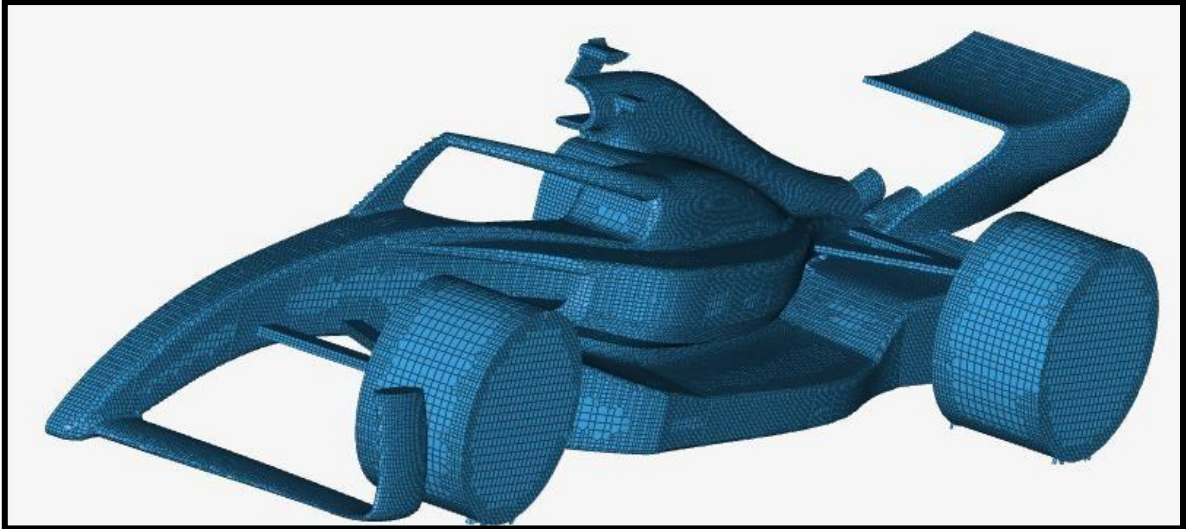


Figura 83. Detalle de la calidad del mallado sobre la superficie de la geometría de referencia.

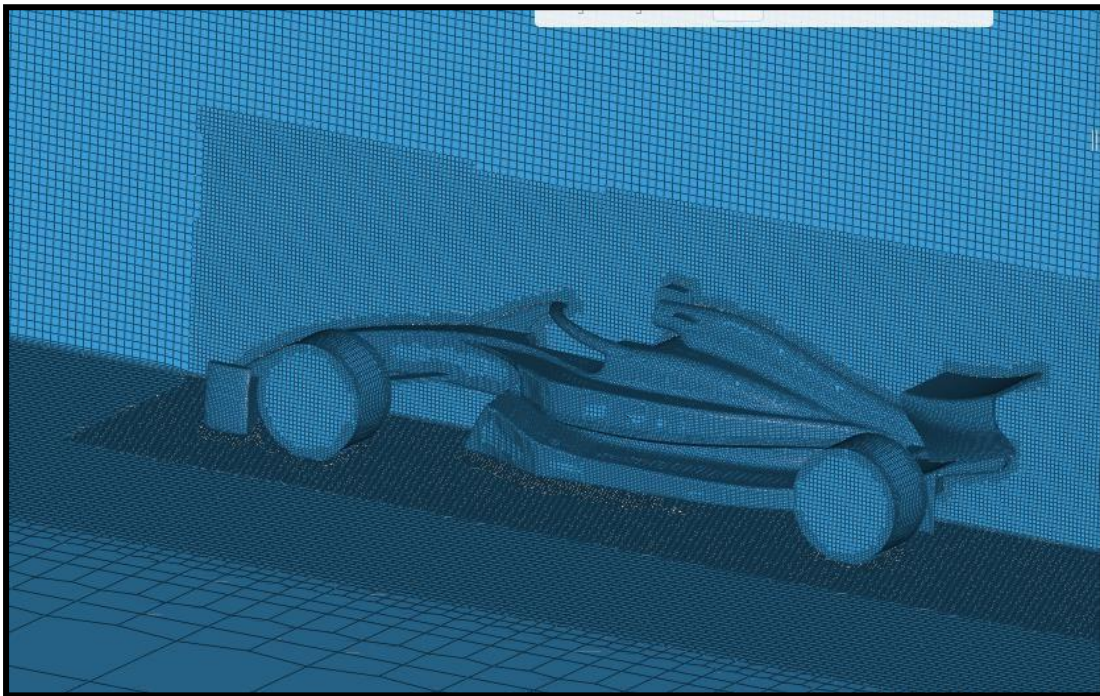


Figura 84. Detalle de la malla refinada dentro de la región de flujo I.

En las imágenes anteriores se muestra la malla en la que hay zonas con gran detalle, como la superficie del sólido que conforma el coche o la región del difusor. En tales áreas abundan celdas de tamaño minúsculo (0,0125 mm aproximadamente de longitud de arista de celda) mediante las cuales se es capaz de capturar con mayor grado de precisión y detalle las propiedades del flujo, gracias a una mejor resolución de las ecuaciones de conservación complejas que gobiernan la dinámica de fluidos. Tras el proceso de mallado es conveniente analizar detenidamente algunos parámetros de la malla y que pueden ser evaluados en Meshing Log, unas métricas de la calidad de la malla. Dichos parámetros dictaminan cómo de apta y adaptable es la malla generada para la simulación que se quiere ejecutar seguidamente. Estos son los siguientes:

1. **VolumeRatio**→ El “ratio de volumen” es la relación de volúmenes existentes que hay entre celdas adyacentes. Es decir, el cociente entre el volumen mayor y menor de dos celdas determinadas adyacentes a una celda en concreto. El valor ideal por obtener es 1 y contra más cercano a 1, la malla es de mayor calidad [77].
2. **nonOrthogonality**→ Imaginando dos celdas juntas adyacentes, la ortogonalidad es el ángulo que forman el vector que conecta los centros de ambas celdas con el vector normal a la cara compartida por ambas celdas adyacentes. Lo ideal es que dicho ángulo sea lo más bajo posible y que no traspase los 70° (90° es el peor caso), ya que de lo contrario se producen problemas de inestabilidad y de divergencia al tratar de ejecutarse la simulación (Figura 87).
3. **Skewness**→ La oblicuidad es una métrica que cuantifica la desviación existente entre el tamaño óptimo de celda y el tamaño existente. Siendo 0 el caso ideal y 1 el peor valor posible, depende del tipo de celda puede haber diferentes métodos de cálculo de la oblicuidad, y en el caso que atañe esta malla generada, se trata de una malla conformada por elementos hexaédricos. La oblicuidad para este tipo de elementos mide la desviación entre los ángulos en los vértices de los pares de caras de un hexaedro y el ángulo de 90 grados ideal [77]. Es decir, como de desviado respecto a 90° se encuentra el ángulo entre dos pares de caras de un hexaedro. Pese a ser 1 el peor caso, es recomendable mantener el valor medio por debajo de 0,33, porque de lo contrario la simulación reportaría problemas de divergencia y de precisión de los resultados.

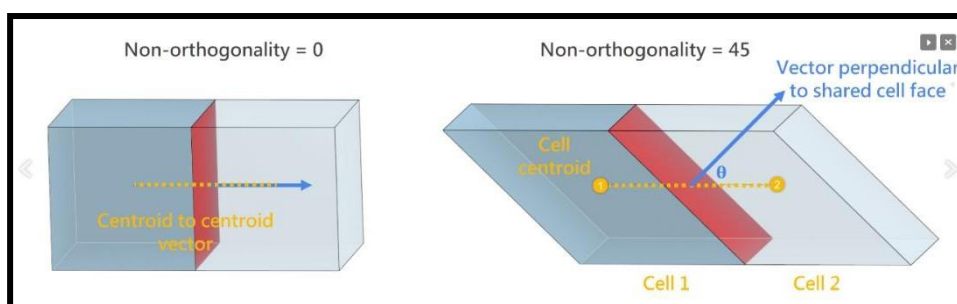


Figura 85. Representación de la no-ortogonalidad respecto al centroide de celda y caras de celdas compartidas. Fuente: SimScale [77]

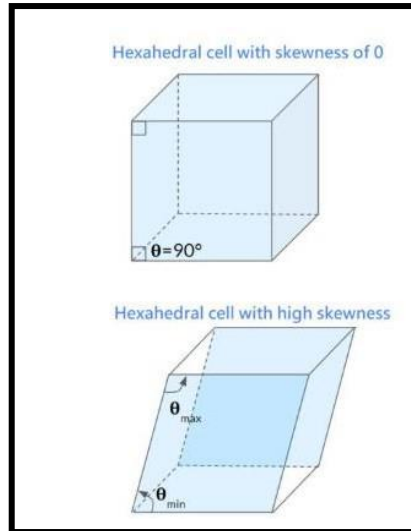


Figura 87. Comparación de oblicuidad alta y bajo entre dos elementos hexaédricos. Fuente: SimScale [77]

```

End
Finalising parallel run
Mesh quality metrics:
volumeRatio
Acceptable range: 0 to 100
  min: 1
  max: 161.38959315300545
  average: 1.3099751014810532
  standard deviation 1.3279606004583377
  median: 1.0008032700826555
    99.9-th percentile: 10.149023348800146
    99.99-th percentile: 23.924126615820754
    99.999-th percentile: 45.67842160065168
nonOrthogonality
Acceptable range: 0 to 88
  min: 0
  max: 89.42392855923278
  average: 2.6975449024028597
  standard deviation 6.07527110206285
  median: 0.6240361468347639
    99.9-th percentile: 50.80068347058869
    99.99-th percentile: 68.70284265576643
    99.999-th percentile: 82.45968139016892
skewness
Acceptable range: 0 to 100
  min: 0
  max: 6.7514282897038385
  average: 0.025909582281205008
  standard deviation 0.11190707634325651
  median: 0.0003302145995920824
    99.9-th percentile: 1.66173168278148
    99.99-th percentile: 2.8613441329435148
    99.999-th percentile: 3.6437201013828453
Overall mesh quality (based on the 99.99-percentile): 0.363277
Acceptable range: 0.035 to 1.0
Overall mesh quality is computed from:
  Non Orthogonality: 68.698431 (normalized value: 0.363277, weight: 1.00)

```

Figura 86. Resultados de las métricas de calidad de malla I.

Como se observa en la imagen anterior, tras generarse la malla se proveen los resultados de los parámetros de malla que dictaminan la calidad de la malla generada y la aptitud de esta para albergar la simulación que se pretende llevar a cabo.

En primer lugar, en cuanto al volumeRatio , se observa un valor medio de 1,309 y un valor máximo de 161,38, bastante alto. Podría añadirse algunas correcciones en la geometría CAD para mejorar más la calidad de malla y bajar este valor máximo, pero el valor medio es decente y aceptable para proseguir.

En segundo lugar, en cuanto a la no-ortogonalidad el valor medio es de 2,69- bastante aceptable-, pero su valor máximo es de 89,42. Teniendo en cuenta que el valor medio ya es bueno, y que se le añadieron en los parámetros de control numérico de la simulación correctores ortogonales, se da por bueno.

Por último, la oblicuidad, pese a tener un valor máximo de 6, al tener un valor medio de 0,026 se considera aceptable y apto. Así pues, la calidad global de la malla, entre un rango de aptitud de 0,035 y 1, es de 0,36. En líneas generales es una malla mejorable, cuyos parámetros pueden ser más pulidos y corregidos realizando tareas de limpieza en la geometría del CAD, pero es más que apta para dar lugar a la simulación que se quiere llevar a cabo.

7.3.2 POST-PROCESAMIENTO I

La simulación transitoria de 2s una vez ejecutada, finaliza tras 114 minutos y tras requerir 61,33 horas computacionales. Antes de pasar a evaluar los resultados obtenidos es importante echar un vistazo a la gráfica de convergencia y comprobar los residuos de los parámetros a analizar. Los residuos son los desbalances de las soluciones, por lo que, para obtener resultados precisos y detallados, es conveniente que dichos residuos sean lo más bajos posibles. Teóricamente, con valores ya por debajo de $1e-3$, se estima que la solución está bastante estabilizada y es precisa.

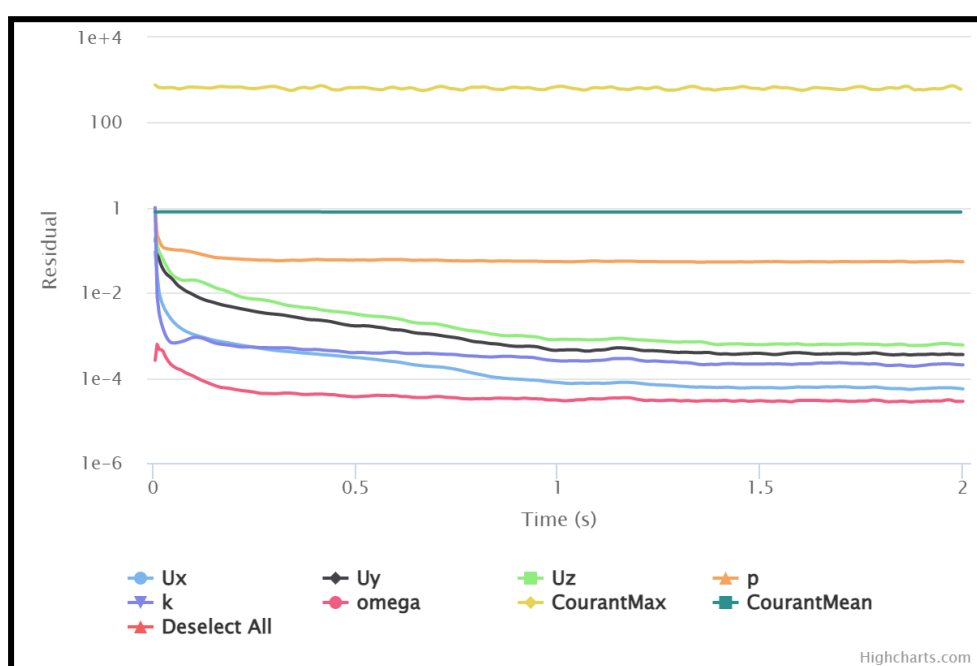


Figura 88. Gráfico de convergencia de los residuos I.

Como se observa, los residuos de la mayoría de los parámetros se estabilizan por debajo de $1e-3$. La presión, reflejada en naranja, tiene un valor de 0,05, aceptable, teniendo en cuenta que es un parámetro que le cuesta mucho obtener residuos mucho más bajos como el resto. El valor medio del número de Courant está por debajo de 1, pese a que al utilizarse un algoritmo PIMPLE puede adquirir valores mayores a 1. Así pues, la simulación un poco antes de los 1,5s converge y se estabiliza plenamente, dándose la confirmación para poder pasar a analizar los resultados obtenidos definitivamente.

7.4 SIMULACIÓN DE LA GEOMETRÍA MODIFICADA

Tras simular y evaluar los resultados obtenidos en la geometría de referencia, la segunda parte de la parte práctica de esta memoria consiste en realizar la misma simulación, pero con un sensible y muy ligero cambio a la geometría. En la primera simulación, se mencionó que la geometría de referencia tiene una altura de manejo trasera de 112 mm y delantera de 63 mm. Tras unos retoques en SolidWorks, se pretende añadir de una forma algo simplista y rápida más suelo a la geometría del fondo plano del coche original con tal de recrear el mismo coche de F1, pero con una altura de manejo ligeramente más baja que en el caso original. **Así pues, se rebaja la altura de manejo o *ride height* de 112 mm a 97 mm en el eje trasero, y de 63 mm a 48 mm en el eje delantero.** Como se puede apreciar, se conserva en ambos casos el mismo *rake* o ángulo de inclinación del suelo al modificarse en la misma proporción la parte delantera y trasera.

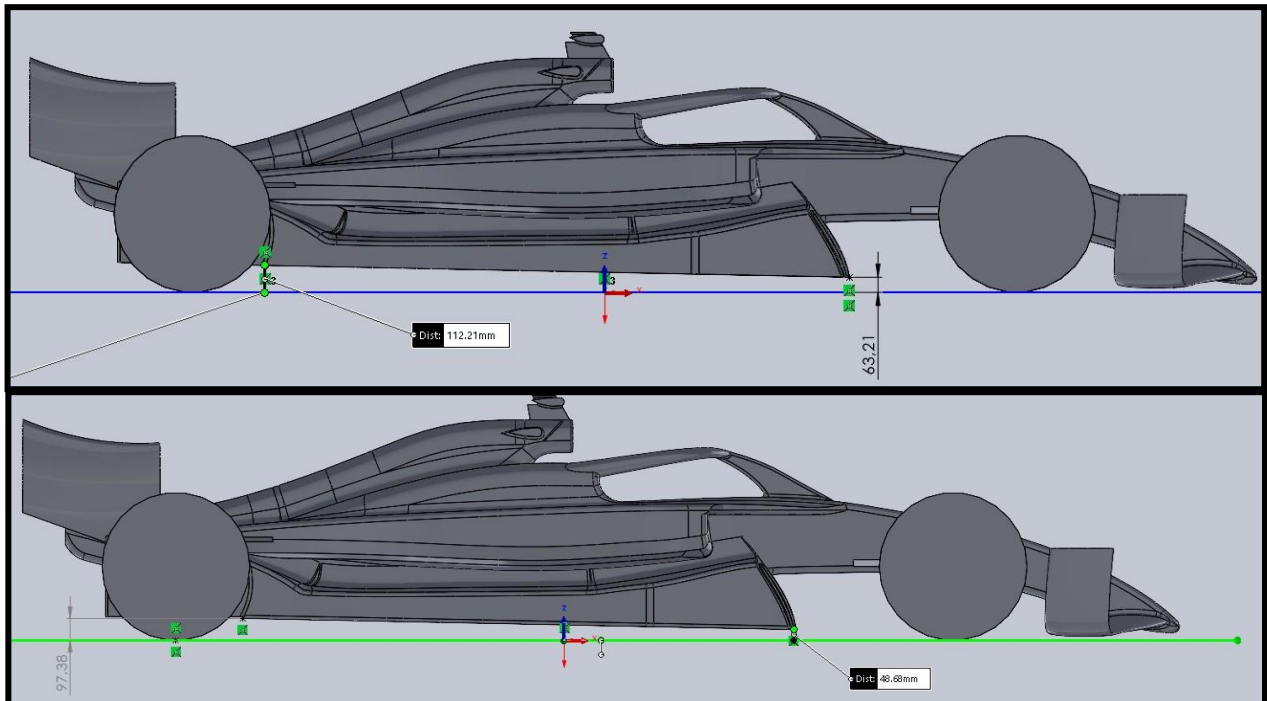


Figura 89. Altura de manejo CAD geometría de referencia (arriba), altura de manejo CAD geometría modificada (abajo).

La simulación que se pretende llevar a cabo es exactamente la misma que en el primer caso, donde lo único que varía es la geometría, sensiblemente diferente al caso original. Es decir, se vuelve a realizar una simulación de flujo incompresible transitoria con el algoritmo PIMPLE. Se recrea exactamente el mismo dominio de flujo (aire) con las mismas dimensiones de caja que en el caso original [Figura 72], se establecen las mismas entidades topológicas, exactamente las mismas condiciones de frontera [Figura 74, 75 y 76], mismos parámetros numéricos [Figura 78], mismos controles de simulación [Figura 77], y mismos parámetros de control de resultados de fuerzas y momentos [Figura 79]. Además, en cuanto al mallado, mismos refinamientos, con las mismas regiones y coordenadas de refinamiento, y mismo algoritmo de mallado.

7.4.1 RESULTADOS DE LAS MÉTRICAS DE CALIDAD DE MALLA II

La malla, con el algoritmo mallador automático *Hex-Dominant*, genera una malla de 3 millones de celdas y 3,3 millones de nodos, prácticamente igual que en el caso original, tras 22 minutos y 12,27 horas computacionales consumidas. Como se puede observar en las ilustraciones posteriores, la geometría posee las mismas áreas de refinamiento que en el primer caso, y con la misma precisión y control de tamaño máximo de las celdas.

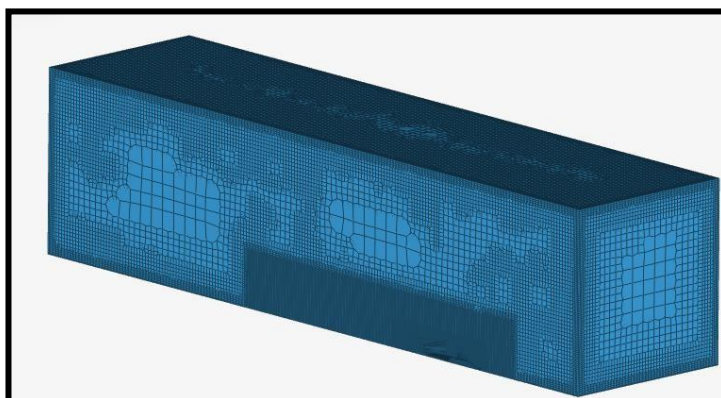


Figura 90. Aspecto general del mallado de dominio II.

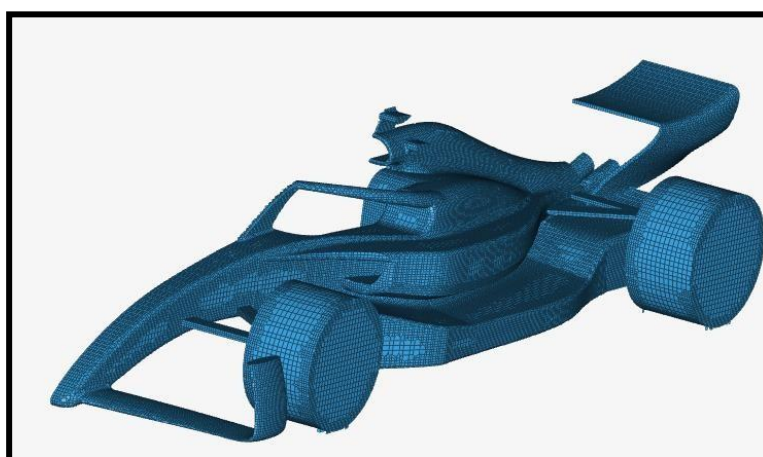


Figura 91. Detalle de la calidad del mallado sobre la superficie de la geometría modificada.

```

End
Finalising parallel run
Mesh quality metrics:
volumeRatio
Acceptable range: 0 to 100
  min: 1
  max: 97.47972225587182
  average: 1.308739755470336
  standard deviation 1.3242315522216546
  median: 1.000809082745678
    99.9-th percentile: 10.146116586648088
    99.99-th percentile: 24.055455408495675
    99.999-th percentile: 47.5421379608564
nonOrthogonality
Acceptable range: 0 to 88
  min: 0
  max: 89.8519479702806
  average: 2.6739768816915954
  standard deviation 6.026387094599085
  median: 0.6172910941847992
    99.9-th percentile: 50.39418216965405
    99.99-th percentile: 69.03249107420827
    99.999-th percentile: 82.35205425996877
skewness
Acceptable range: 0 to 100
  min: 0
  max: 6.8215233941792945
  average: 0.025683887971582938
  standard deviation 0.11014067491432411
  median: 0.0003234418315041748
    99.9-th percentile: 1.5721956476491634
    99.99-th percentile: 2.852219371685945
    99.999-th percentile: 3.6316060669640366
Overall mesh quality (based on the 99.99-percentile): 0.357838
Acceptable range: 0.035 to 1.0
Overall mesh quality is computed from:
  Non Orthogonality: 69.032491 (normalized value: 0.357838, weight: 1.00)

```

Figura 92. Resultados de las métricas de calidad de malla II.

En cuanto a los resultados de los parámetros que dictamina la calidad resultante de la malla son los siguientes: la ratio de volumen adquiere un valor máximo de 97,48, bastante alto (pero mucho más bajo que la primera malla), aunque la media es de 1,308, más que aceptable para darlo por bueno.

La no-ortogonalidad adquiere valores máximos de 89,85, bastante alto, y un valor medio de 2,67. Es decir, valores casi idénticos a la primera simulación, por lo que se considera aceptable. Por último, en cuanto a la oblicuidad, se adquiere valores máximos contraproducentes de 6,82, pero el valor medio es de 0,025, también aceptable. La calidad de la malla global es cualificada en 0,357, en un rango de aptitud de entre 0,035 a 1, por lo que la malla a priori debe ser suficientemente buena como para proceder a ejecutar la simulación del monoplaza de F1 modificado.

COMPARACIÓN MALLAS	F1 con altura de 112mm		F1 con altura de 97mm	
	Máximo valor	Media	Máximo valor	Media
Ratio volumen	161,39	1,309	97,48	1,308
No- ortogonalidad	89,42	2,69	89,85	2,67
Oblicuidad	6,75	0,0259	6,82	0,0256
Calidad de malla global (sobre 1)	0,363		0,357	

Tabla 3. Comparativa de las métricas de calidad de malla entre las dos simulaciones.

Como se observa en la tabla ilustrada, los parámetros o métricas son muy similares, al igual que la calidad de malla general. Esto es lo previsiblemente esperado, ya que los parámetros de mallado son idénticos en ambos casos, al igual que los refinamientos, y la única diferencia es una muy ligera modificación de la geometría del fondo plano del coche, por lo que ambas mallas deben tener una calidad cuasi idéntica ante la escasez de diferencias entre un caso y otro.

7.4.2 POST-PROCESAMIENTO II

La simulación es ejecutada y tras 113 minutos y 60,27 horas computacionales consumidas, la simulación transitoria de 2s es procesada satisfactoriamente. Como se puede observar en la imagen posterior, los residuos de todos los parámetros convergen sin problemas por debajo de $1e-3$ (excepto la presión en naranja debido a sus dificultades), siendo a partir de entre 0,8 a 1s cuando los residuos se estabilizan hasta el final de la simulación. Por lo tanto, los resultados recogidos son fiables al ser suficientemente estables.

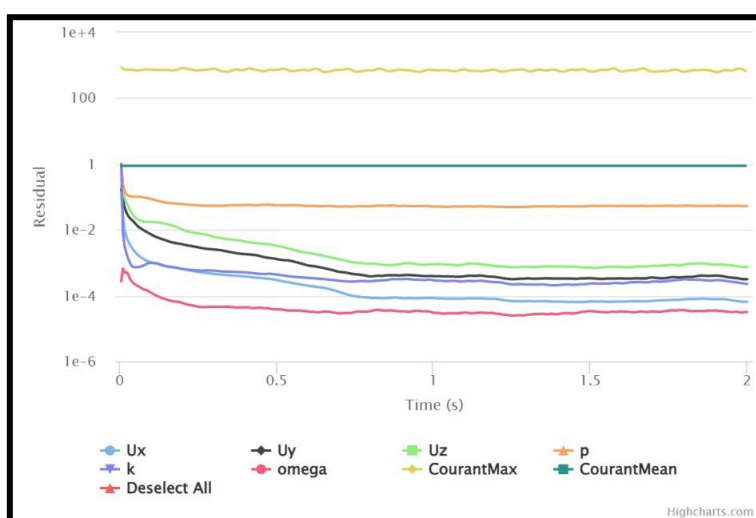


Figura 93. Gráfico de convergencia de residuos II.

7.5 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Una vez ejecutadas las simulaciones de ambos casos y comprobar que sus residuos han convergido y se han estabilizado satisfactoriamente, se procederá a realizar una comparativa de los resultados obtenidos entre los dos escenarios. Se evaluarán las principales fuerzas aerodinámicas que actúan en un monoplaza, como lo son la fuerza de resistencia al avance y de sustentación, además de sus correspondientes coeficientes aerodinámicos, y, por último, el mapa de velocidades y gradientes de presiones en los contornos y superficie del monoplaza respectivamente. Para simplificar más el mensaje y hacerlo más eficiente, se denominará coche alto a la geometría con mayor altura de manejo (112 mm), y coche bajo a la geometría con menor altura de manejo (97 mm).

7.5.1 FUERZA DE RESISTENCIA AL AVANCE

La fuerza de resistencia al avance es aquella fuerza con la misma dirección de desplazamiento del coche, pero de sentido opuesto, por lo que se opone al movimiento. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en forma de gráfico de la variación de la fuerza de resistencia al avance (fuerza de presión en el eje X) a lo largo de 2 segundos tanto para el coche alto (arriba) como para el coche bajo (abajo).

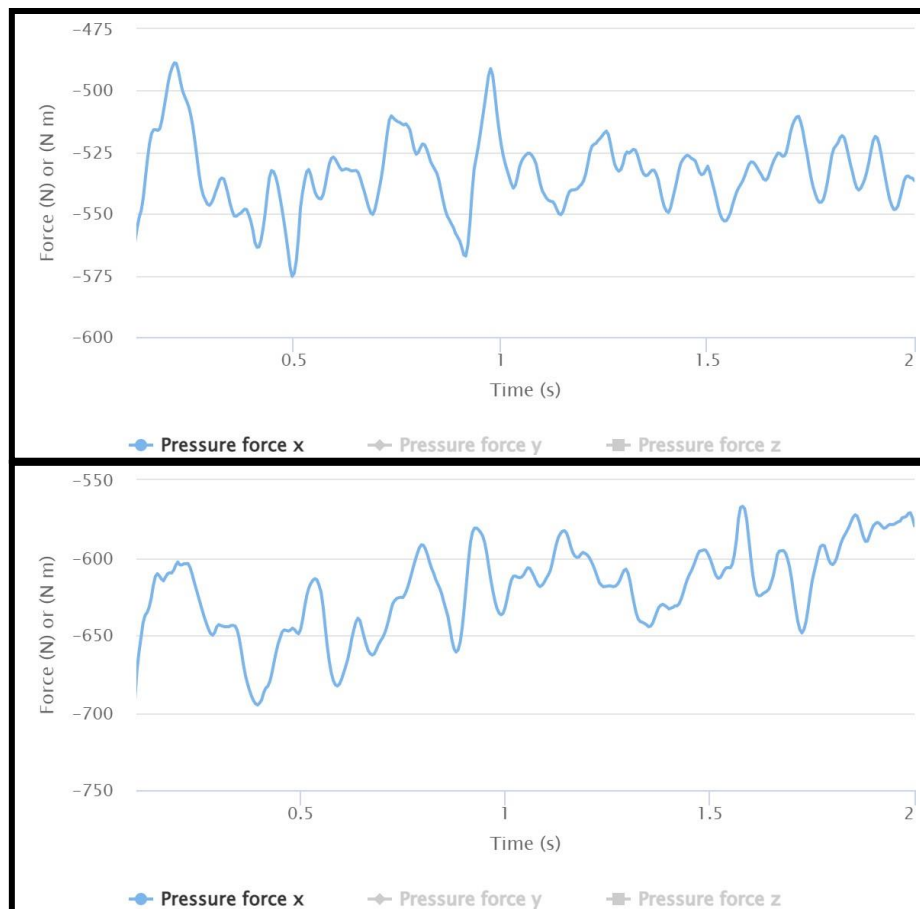


Figura 94. Variación temporal del drag (N) en el coche alto (arriba) y en el coche bajo (abajo).

Como se puede observar, el coche alto adquiere una fuerza mínima aproximada de 490 N, y una fuerza de resistencia al avance máxima de hasta 575 N. Incidir que el valor de las fuerzas es negativo debido a que su vector se encuentra en el eje negativo del eje x, además de que el valor de estas se debería duplicar con tal de conocer el valor real, ya que solo se ha simulado una mitad del monoplaza. No obstante, se observa que mayoritariamente los valores fluctúan de forma regular entre 515 y 550 N, por lo que la fuerza de resistencia al avance media es de aproximadamente 533 N.

Sin embargo, echando un vistazo al gráfico del coche bajo, se observan valores de fuerza de resistencia al avance más grandes que en el primer caso. Los valores mínimos van hasta los 570 N, y los máximos se elevan por encima de los 690 N. Aun así, se puede observar que pasados los 0,75 segundos aproximadamente, las fluctuaciones se regulan más y los valores divergen entre 570 y 650 N aproximadamente, estando la media en 610N.

De esta manera, se observa una disminución de la resistencia al avance al subir unos 15 mm el suelo del coche por detrás de aproximadamente 100 N, lo que reporta a priori una cierta ventaja en cuanto al objetivo de la consecución de velocidad punta en una recta.

7.5.2 COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL AVANCE

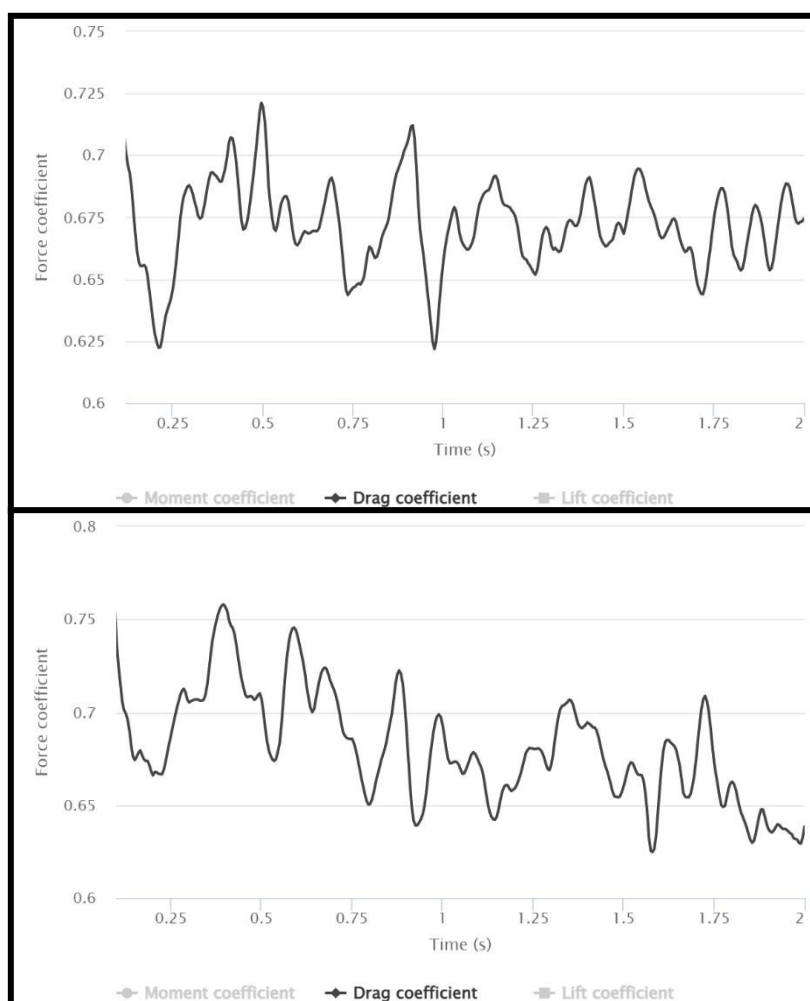


Figura 95. Variación temporal del coeficiente de drag en el coche alto (arriba) y en el coche bajo (abajo).

En cuanto al coeficiente de resistencia al avance, número definido como adimensional, el coche alto adquiere valores mínimos de 0,62 y máximos de 0,72. Aun así, quitando los picos de máximos y mínimos, la mayoría de las fluctuaciones de valores regulares van de 0,65 a 0,69, estando la media en 0,67 aproximadamente.

Por otra parte, el coche bajo presenta unos valores de coeficiente sensiblemente más altos, con mínimos en 0,63 y máximos en 0,75, no acabándose de registrar fluctuaciones más regulares a lo largo de los 2 segundos, pese a que los valores comienzan a caer muy ligeramente en el último segundo. La media se encuentra en 0,69 aproximadamente, sensiblemente superior al coche alto, pero casi idéntico debido a que la geometría entre un monoplaza y el otro es la misma, de no ser por una altura del fondo plano milimétricamente diferente en un caso y en el otro.

7.5.3 FUERZA DE SUSTENTACIÓN NEGATIVA

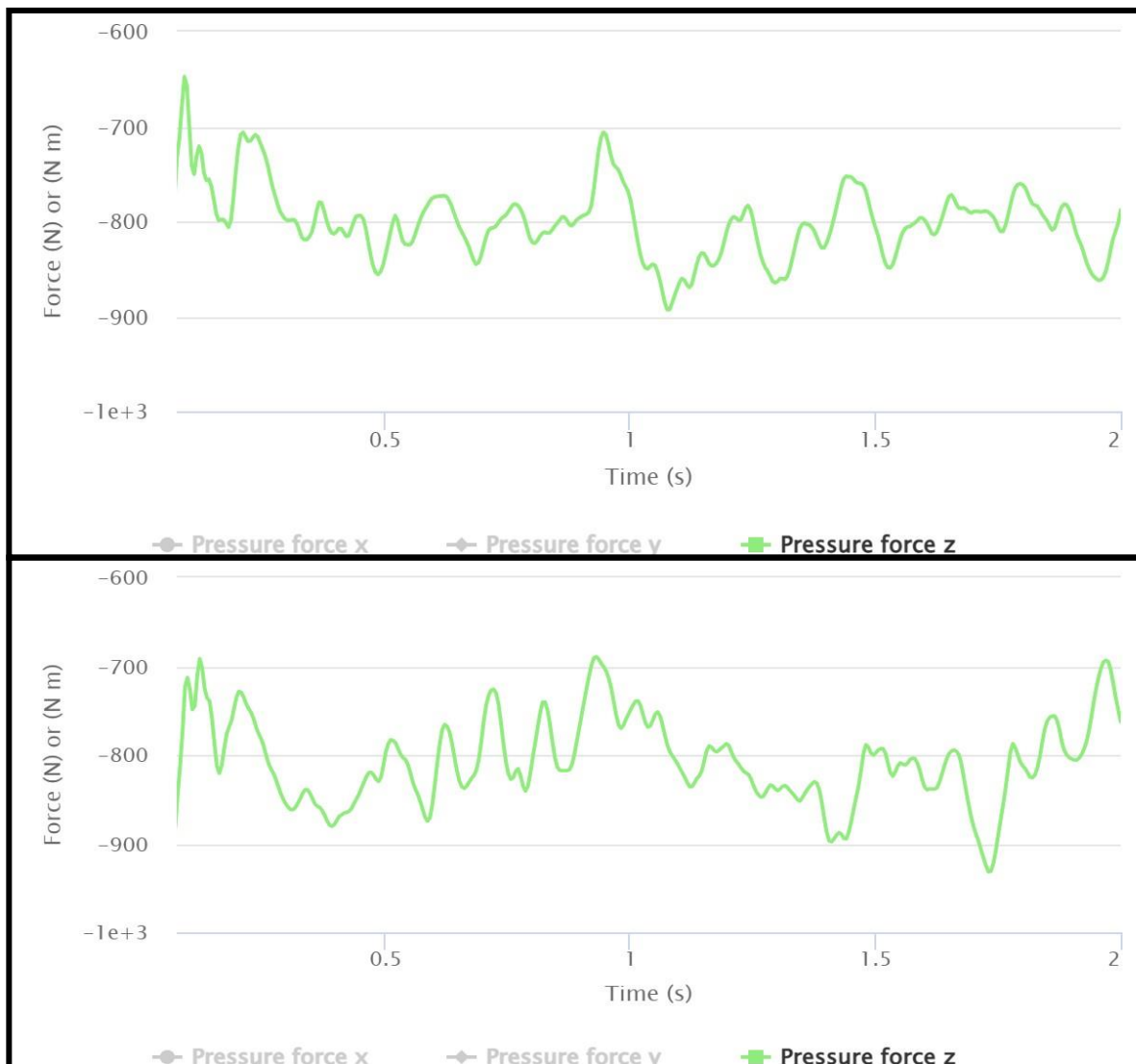


Figura 96. Variación temporal del downforce (N) en coche alto (arriba) y coche bajo (abajo).

La carga aerodinámica o fuerza de sustentación negativa, es la fuerza vertical en el sentido negativo del eje z que presiona el monoplaza contra el suelo. Al igual que la fuerza de resistencia al avance, también adquiere valores negativos al actuar dicha fuerza en sentido opuesto al eje z+, y los valores han de ser duplicados en caso de querer conocer el valor de carga aerodinámica teórico del monoplaza entero, y no solamente de una de sus mitades simétricas.

En cuanto al coche alto, el pico mínimo de succión es de 650 N, y el máximo de unos 895N aproximadamente, estando la media rondando los 773 N. No obstante, en la mayoría de la simulación la fluctuación de valores se estabiliza entre un rango de 700 a 865N, subiendo la media a 782 N aproximadamente.

Analizando ahora al monoplaza con suelo más bajo, los valores mínimos rondan los 690 N y el valor máximo registrado alcanza los 932 N, por lo que la media se dispara a aproximadamente 810 N. Cabe decir, que, a diferencia del coche alto, en esta simulación cuesta encontrar una fluctuación de valores mínimamente estable y regular, siendo las variaciones de mínimos y máximos más acentuadas si cabe que en el primer caso.

Tras analizar ambos gráficos, se puede afirmar que bajando el suelo del coche 15 mm se espera una ganancia teórica de entre aproximadamente 30 a 40 N de carga aerodinámica. O lo que es lo mismo, una pérdida sensible de carga de entre 3 a 4kg de *downforce* al subir el suelo del coche. Hay que recordar que la altura de manejo de un coche como un F1 y la carga aerodinámica van muy ligados de la mano, al haber una correlación extremadamente sensible entre la variación de alturas y la variación de la sustentación. Es por eso, que al bajar el suelo del coche puede que la variación de la carga aerodinámica sea más sensible, y por ello, se observan fluctuaciones más severas en el segundo caso que en el primero, emulando una especie de pequeño marsopeo. Sin embargo, no es más que una mera hipótesis, ante la imposibilidad de conocer con estos programas y softwares de simulación la variación en el tiempo de las alturas de manejo de la geometría.

7.5.4 COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN

Al igual que en el caso de la fuerza de resistencia al avance, este coeficiente es un valor adimensional cuyo valor está relacionado con la geometría del cuerpo aerodinámico en cuestión. Hay que mencionar que estos coeficientes, a diferencia de los valores de fuerza de presión, no han de ser duplicados con tal de conocer su valor real con el coche completo.

En cuanto al coche alto, este presenta unos valores mínimos de 0,76 y un pico máximo de 1,05, por lo que la media está en 0,90. Aun así, las fluctuaciones se regulan más con el paso del tiempo y los valores medios van creciendo paulatinamente, habiendo variaciones de entre 0,90 a 1,020, subiendo la media a aproximadamente 0,96.

Sin embargo, en cuanto al coche bajo, los valores mínimos van de 0,72 y el pico máximo es 0,96, estando la media en 0,85. Es decir, el coeficiente de sustentación del coche bajo es aproximadamente entre 0,05 y 0,1 más pequeño que el coeficiente del coche alto. Pese a que es una diferencia meramente escasa y poco diferencial (de un 5 a un 10% más pequeño), es un resultado que no encaja con lo previsto, debido a que, al registrarse valores de carga aerodinámica más altos en el coche bajo, es esperado que la misma geometría presente valores de coeficiente de sustentación más altos que el coche alto. Se han revisado todos los parámetros de la simulación y las modificaciones hechas en la geometría, y tras no detectar personalmente ninguna falla, se ha proseguido con el análisis considerando este un resultado anómalo a no tener en cuenta.



Figura 97. Variación en el tiempo del coeficiente de sustentación en coche alto (arriba) y coche bajo (abajo).

7.5.5 ANÁLISIS DE LOS CAMPOS DE SOLUCIÓN

Una vez evaluados los resultados numéricos de ambas simulaciones, se procederá a estudiar los mapas aerodinámicos de la distribución de presiones y el contorno de ambos monoplazas. De esta manera, se mira de realizar una comparación visual entre ambos casos y percatarse de si existe una correlación entre las diferencias numéricas antes vistas y los mapas de presión y velocidades de las dos simulaciones.

En primer lugar, en cuanto a la distribución de presiones sobre la superficie de las dos geometrías, este parámetro en Pascales va de un rango de -2500 a 2000, habiendo la distinción de colores en la leyenda de la foto.

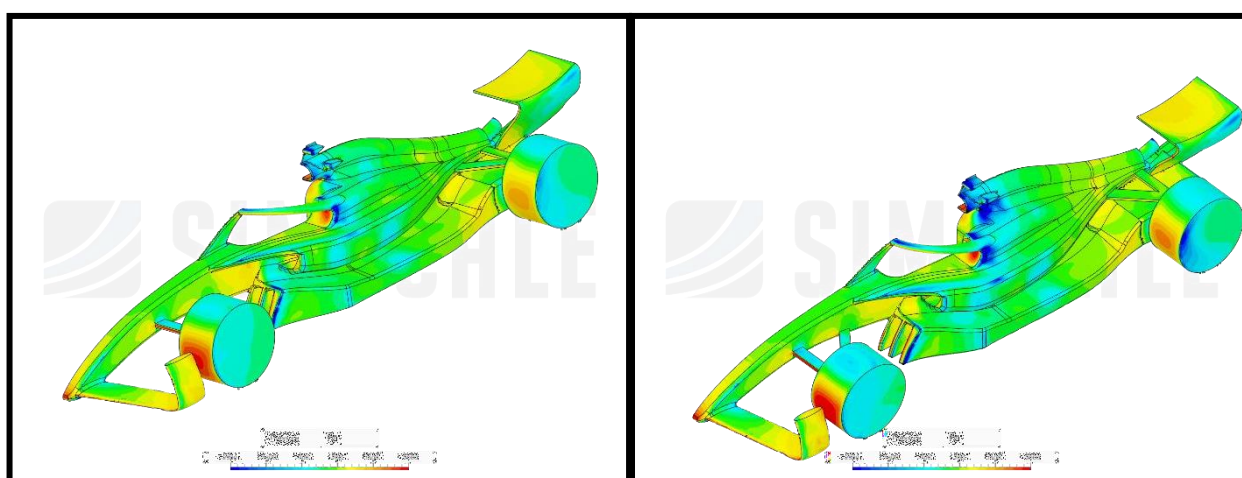


Figura 98. Vista isométrica comparativa de la distribución de presiones sobre la superficie del coche alto (izquierda) y coche bajo (derecha).

Echando un vistazo a esta perspectiva, se pueden observar en ambos modelos que, en los elementos generadores de carga aerodinámica, ya sea alerones, difusores u otros deflectores, hay un cierto color más amarillento y anaranjado que en otras zonas en sus caras superiores. Según la leyenda, dichos colores reflejan rangos de presión sustancialmente altos, dando a entender que son regiones de alta presión. Como se ha abordado en el marco teórico de este documento, al haber una diferencia de presiones en un perfil alar, la zona de alta presión busca siempre de alguna forma a la zona de baja presión. De esta manera, se puede apreciar cómo se ejerce sobre las caras superiores del alerón delantero y trasero, además de la cara superior del difusor (justo debajo del alerón trasero), una alta presión contra el asfalto, siendo estos hechos clave para generar carga aerodinámica.

En cuanto a una comparativa diferenciadora entre ambos modelos, se observan distribuciones de presiones muy similares. No obstante, y prestando atención a detalles aparentemente desapercibidos, puede observarse una diferencia en los colores del alerón trasero. El del coche bajo, a diferencia del del coche alto, tiene una mancha sensiblemente más anaranjada en el centro del alerón, cosa que no tiene el alerón del coche alto. De esta manera, se intuye que el alerón trasero sufre una presión ligeramente más alta en su perfil superior que no el coche alto, posiblemente por una diferencia de ángulos de ataque.

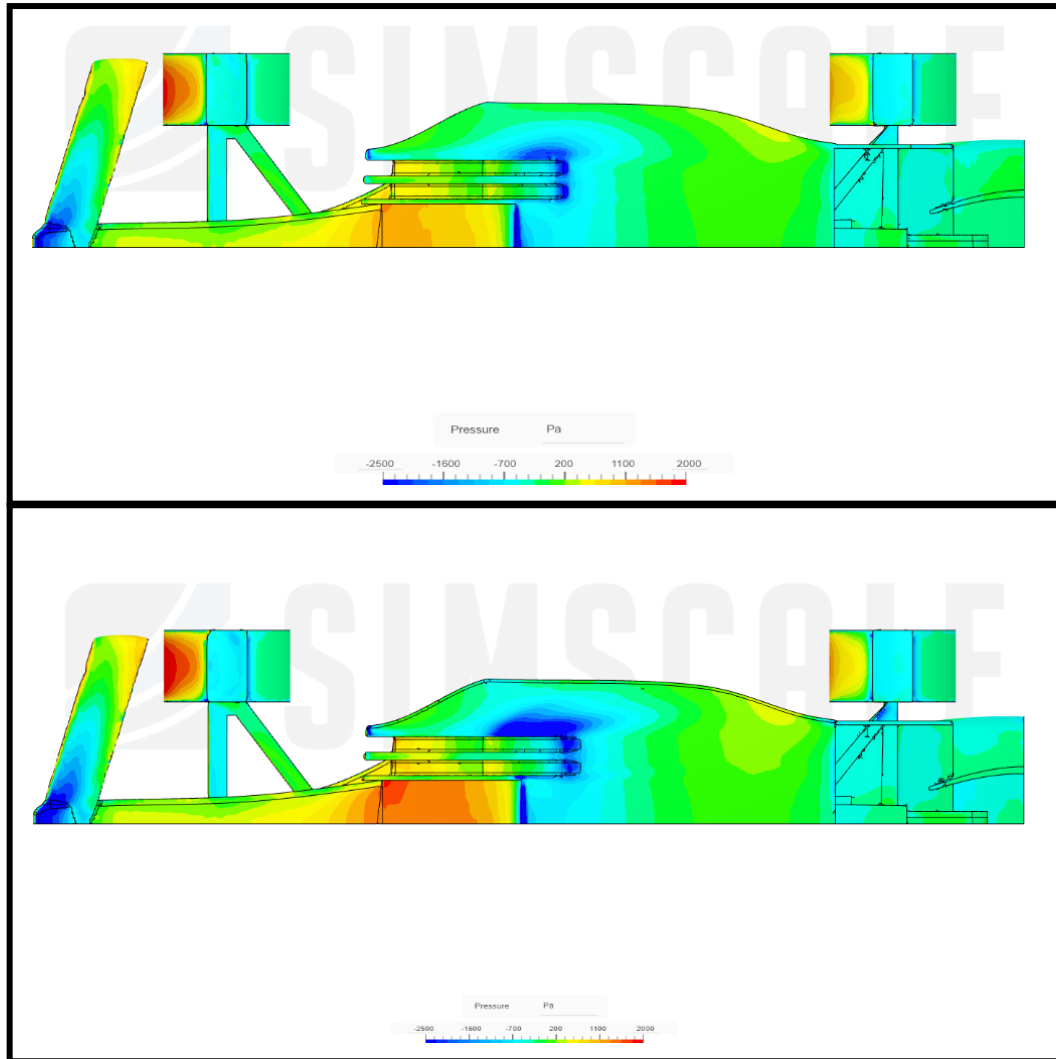


Figura 99. Vista en planta comparativa de la distribución de presiones en el fondo plano del coche alto (arriba) y coche bajo (abajo).

Visualizando ahora el mismo campo de presiones, pero justo debajo de los monoplazas, en la parte inferior del fondo plano, se pueden rescatar varios puntos llamativos. Según la leyenda, los colores azulados en todas sus tonalidades representan valores negativos de presión, o lo que es lo mismo, áreas de muy baja presión. Esto se puede apreciar en la cara inferior del ala delantera, del ala trasera o incluso en la porción delantera inferior del fondo plano. Estas zonas al poseer áreas de baja presión incitan a las zonas de alta presión justo encima del ala a desplazarse al perfil inferior originando la fuerza de succión tan característica que define el *downforce*. Así pues, se ven zonas de muy baja presión (por encima de -2500N) en el centro del alerón delantero o en los deflectores del fondo plano, además del alerón trasero y difusor pese a que no poseen presiones tan bajas, siendo estos puntos clave de succión contra el asfalto.

Comparando un modelo con el otro, se observa cómo, pese a similitudes obvias, el coche bajo posee mayores regiones de muy baja presión (color azul marino) que el coche alto, especialmente en el fondo plano, y también tiene zonas más azuladas debajo del alerón trasero que el coche alto. Por lo tanto, esto no hace más que corroborar los resultados numéricos analizados previamente en los gráficos de fuerza de sustentación negativa, donde el coche bajo genera ligeramente más carga aerodinámica que el coche alto.

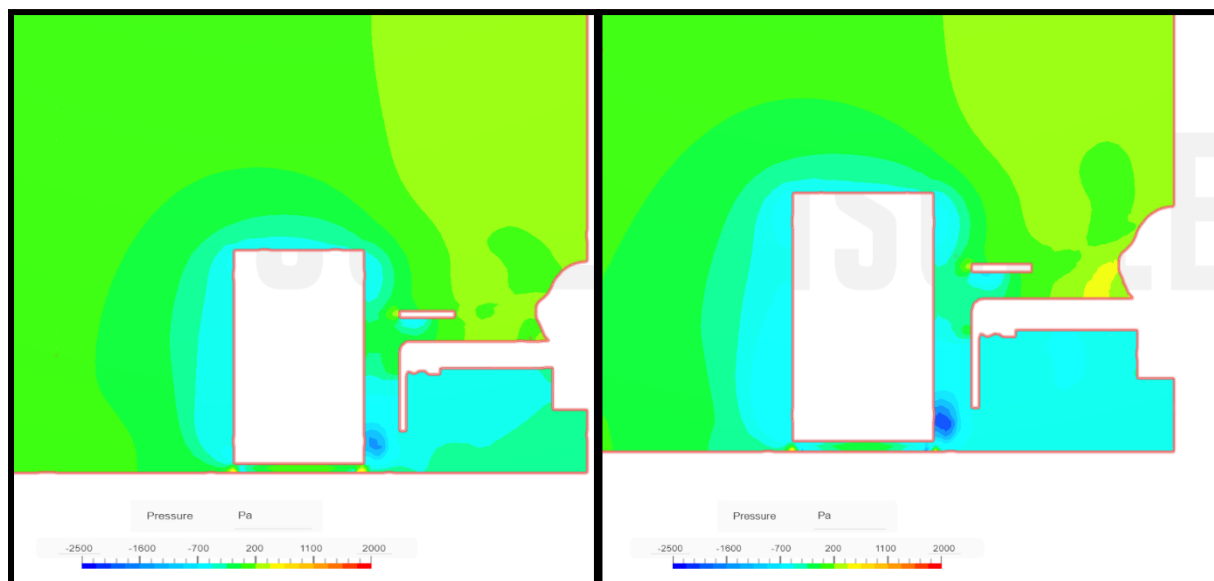


Figura 100. Comparativa de mapas de presiones en sección vertical del difusor en coche alto (izquierda) y coche bajo (abajo).

Si se realiza un plano de sección normal al eje x a la altura del difusor de las geometrías de ambos monoplasas, quedan las dos secciones reflejadas en las imágenes superiores. Se visualiza la estructura o geometría del difusor visto desde detrás del coche y el mapa de presiones justo en esa sección, al ser el difusor uno de los elementos generadores de carga aerodinámica más relevantes como se ha abordado páginas atrás.

Como se observa, ambos contienen zonas azuladas de baja presión debajo del difusor mientras que, por encima, colores verdosos, la presión es superior. De esta manera, se contempla la diferencia obvia de presiones entre las dos caras de un perfil. Pasando a la comparación, se aprecia como el coche bajo contiene más región azulada que el coche alto debajo del difusor, demostrando que el difusor del coche bajo con el difusor más cerca del asfalto genera más carga aerodinámica debido a que el diferencial de presiones entre la parte superior e inferior del coche es mayor.

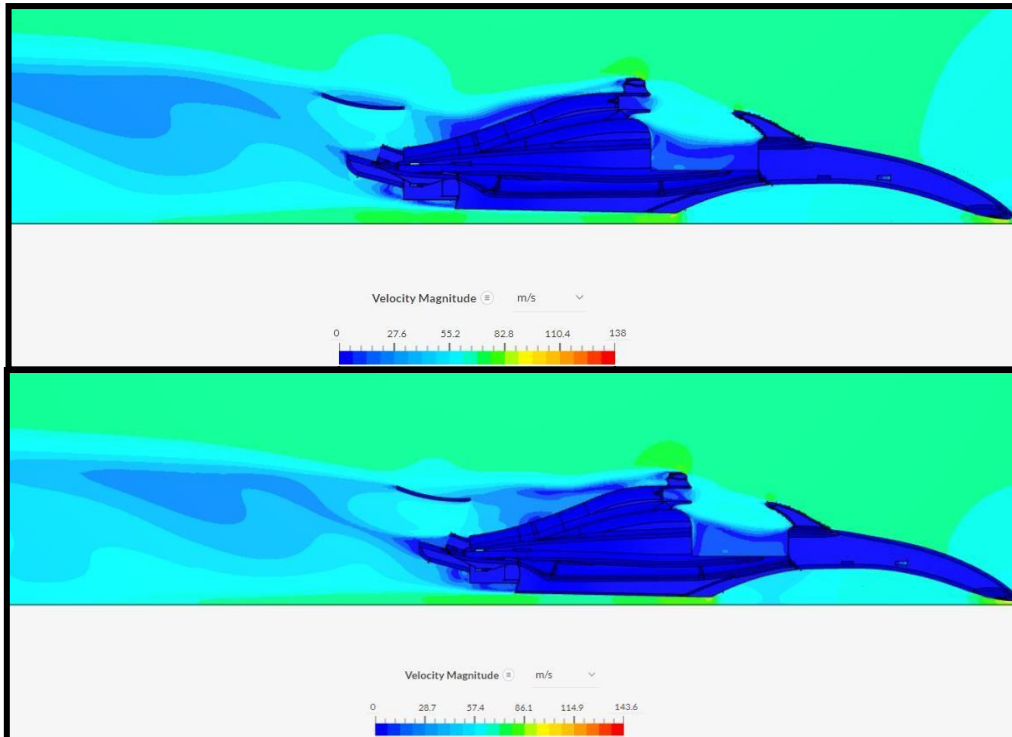


Figura 101. Comparativa de contornos de velocidad en coche alto (arriba) y coche bajo (abajo).

En cuanto al contorno de velocidades alrededor de los monoplazas, se observa como debajo del coche la velocidad de flujo es bastante mayor que encima de la geometría donde la velocidad es más baja. Hay que aclarar que, al añadir una condición de frontera de no deslizamiento a las caras del cuerpo, la velocidad de flujo es 0 en todas las caras debido a la capa límite originada y consecuente gradiente de velocidades cerca de la superficie sólida. Si se presta atención y se aumenta la imagen, se observa una minuciosa diferencia entre ambos modelos. El coche bajo (abajo) presenta en su totalidad una zona más verdosa (mayor velocidad) en el fondo plano que no el coche alto. Esta ligera velocidad de flujo de más puede ser decisiva en cuanto a originar una zona de menor presión, y con ello, mayor fuerza de sustentación.

7.6 CONCLUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Tras la realización de esta parte práctica, se ha podido comprobar un aspecto bastante importante de cara a entender la problemática del marsopeo y lo complejo de su resolución por parte de los ingenieros.

Una de las soluciones aerodinámicas más previsibles y teóricas es levantar más el fondo plano del monoplaza con tal de potenciar menos el efecto suelo, ya que es alejado más de ese punto, pasado el cual se entra en una especie de colapso aerodinámico al romperse el flujo debajo del coche. Pero lo que se ha comprobado en estas dos simulaciones es el motivo por el cual no resulta tan evidente levantar el suelo con tal de erradicar rápidamente el marsopeo.

Los resultados numéricos y gráficos han corroborado en gran medida que una ligera modificación de unos 15 mm de las alturas del suelo conlleva una pérdida, o ganancia según la perspectiva que se mire, de carga aerodinámica pasando de 932 N a 895N. Como se ha abordado en capítulos anteriores, la carga aerodinámica es imprescindible para ganar velocidad en curva y con ellos, rendimiento global del monoplace. Una pérdida de carga, aunque pueda aparentar ser mínima, resulta en centésimas o incluso décimas de segundo pérdidas en el crono. Por eso, en un deporte como la Fórmula 1, donde los márgenes entre el éxito y el fracaso residen en un escaso margen de poco más de 1 segundo, cada décima cuenta, y los equipos no contemplan el subir el suelo del coche como la mejor idea de todas. Es por ello, que a no ser que la amplitud y aceleración vertical del coche sea severa y dañina para suspensiones y piloto, se acaba perdiendo más que ganando al levantar el fondo plano. Además, se observa un aumento de la fuerza de resistencia al avance al bajar el suelo de 575N a 690N, lo que tiene sentido ya que carga aerodinámica y fuerza de resistencia al avance son directamente proporcionales. Destacar que estos resultados son notablemente alejados de valores reales ya que la geometría con la que se ha trabajado es extremadamente minimalista y simplificada, no generando la verdadera carga aerodinámica que genera un monoplace real. No obstante, pese a ser geometrías con diseños alejados de la realidad, se ha buscado ver la comparación entre ellas mismas con alturas de manejo diferentes, en vez de buscar valores numéricos absolutos de la carga y el *drag* generados.

8 SOLUCIONES CONTEMPLADAS

Tras analizar con detenimiento que es el efecto rebote, la naturaleza de este, que aspectos de la nueva reglamentación lo desencadenaron, cómo evolucionó a lo largo del año 2022 en las escuderías, y tras estudiar cómo afecta en el tiempo la variación de alturas de manejo en el rendimiento aerodinámico de un monoplaza de 2022, se procederá a investigar y razonar posibles soluciones de índole aerodinámica y mecánica.

8.1 SOLUCIONES AERODINÁMICAS

- Una de las alternativas más obvias es implementar **rake al monoplaza y levantar el fondo plano desde la parte trasera**. Los monoplazas de 2022 debido a la nueva normativa y configuración de monoplaza, con especial hincapié en el efecto suelo, tienden a llevar un fondo plano prácticamente plano sin inclinación. Incliniéndolo se consigue reducir la succión generada por el efecto suelo, perdiendo carga aerodinámica, pero se consigue evitar que el suelo baje más de la cuenta. Como se ha visto en el estudio práctico de CFD de esta memoria, el coche con altura de manejo más alta ofrecía ligeramente peor rendimiento aerodinámico. De esta manera, pese a no ser lo ideal, se puede incrementar el *rake* (uno mucho menor que en años anteriores) de un monoplaza hasta un punto en el que se consiga reducir notablemente la aceleración vertical del marsopeo, y al mismo tiempo, la pérdida de carga aerodinámica sea lo más mínima posible. Algunos equipos, como Ferrari, Hass o Red Bull, implementaron una altura de manejo delantera mucho más baja que el resto, es decir con **el morro del monoplaza apuntando más hacia abajo, reglaje que favorece la adherencia en curvas lentas y además previene el marsopeo al estar el eje trasero más levantado**. No obstante, un morro más inclinado de lo normal conlleva que el borde del suelo en su parte más delantera tienda a rozar mucho más contra el asfalto y desgastarse [80].
- Los equipos deben prestar atención a como es el comportamiento aerodinámico del monoplaza cuando rueden el coche con una altura de manejo baja, y prestar especial atención, al comportamiento del flujo y si colapsa.
- En cuanto al grado de elasticidad, hay un cierto dilema entre endurecer más el suelo o hacerlo más flexible. Al hacerlo más rígido, tiende a flectar mucho menos, pero en contrapartida, aumenta en peso y no es de gran interés añadir kilos de más al monoplaza. Pero al hacerlo más flexible, debido a las grandes cantidades de carga aerodinámica generadas por el efecto suelo en 2022, el suelo tiende a flectar más de los extremos, y por ello, la altura de manejo se ve reducida en los bordes del suelo, aspecto que desencadena más rebote [80]. Algunos equipos han innovado implementando **barras o tirantes que permiten restringir la flexión de los bordes del suelo**, lo que a la postre acabó siendo la mejor solución temporalmente, hasta que la FIA decidió endurecer los suelos de todos los equipos.
- Algunos equipos, como Ferrari, Hass o Red Bull, implementaron en el **borde delantero del suelo unidades de muelles amortiguadores mediante las cuales tener un control mucho más exhaustivo de la altura de manejo delantera**, y

con ello, mantener un control más férreo del *rake* y de la adherencia del tren delantero [80].

8.2 SOLUCIONES MECÁNICAS

- Tras evaluar los detonantes de aspecto mecánico del marsopeo, se vio la gran relevancia que tiene el movimiento *heave* en el desencadenamiento del fenómeno. Es por ello, que un control exhaustivo en esta fuerza aerodinámica es de vital importancia de cara a restringir la altura de manejo óptima. Cuando el coche oscila arriba y abajo, son sus últimos milímetros de recorrido antes de llegar a su punto más bajo los más importantes y críticos de cara a la consecución del pico máximo de carga aerodinámica. Una de las soluciones es **endurecer tanto el 3r muelle *heave* como su correspondiente amortiguador, pero al mismo tiempo, mantener relativamente blandas las unidades de muelle-amortiguador de cada rueda individualmente**. Es decir, cuando el coche pasa por encima de una irregularidad del asfalto, bache, o un arcén, el muelle blando de la rueda afectada absorba la irregularidad sin problemas, pero al mismo tiempo, que ante la ganancia de carga aerodinámica el 3r muelle restrinja mucho más el recorrido vertical del suelo.
- No solo incrementar la rigidez del 3r muelle *heave* y su muelle amortiguador, sino **incrementar la no-linealidad de su rigidez haciendo esto más progresiva**. Esto se realizaría añadiendo un tope al final del muelle *heave*, de manera que los últimos milímetros críticos de recorrido del muelle sean mucho más controlados incrementando en gran medida su rigidez.
- **Hacer que las válvulas de los amortiguadores de la unidad del muelle *heave* ofrezcan más resistencia al descomprimirse el muelle que al comprimirse**. Los amortiguadores en un F1 contienen válvulas con vástagos de alta velocidad y válvulas con vástagos de baja velocidad. Los amortiguadores con vástagos de baja velocidad son óptimos para controlar en las suspensiones movimientos como cabeceo y balanceo del coche, mientras que los de alta velocidad son ideales para cuando se pretende que las suspensiones absorban muy rápidamente irregularidades y baches en el asfalto [80]. Por lo tanto, para controlar el movimiento *heave* lo ideal es instalar amortiguadores que se compriman mucho más lentamente, con tal de que al descomprimirse no lo haga súbitamente y aumenten de altura las suspensiones repentinamente. Esto último provocaría una oscilación de las suspensiones mucho más descontrolada y caótica, comportamiento muy común en el marsopeo.

9 RESUMEN DE PRESUPUESTO

En la tabla siguiente se ilustra un desglose general del resumen presupuestario del presente proyecto con el precio de cada campo y el precio final. Para información más detallada de cada campo y averiguar que se ha tenido en cuenta para extraer el precio final en cada uno de ellos, el documento de presupuesto es anexado en un fichero separado de la presente memoria y ahí la información mencionada previamente es especificada con detalle.

CAMPO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD DE HORAS	€/item	TOTAL
Ingeniería	Búsqueda de información	300	18	5.400 €
	Trabajo CAD	15	18	270 €
	Trabajo CFD	125	18	2.250 €
	Redacción documentación	160	18	2.880 €
	Precio total ingeniería	600h		10.800 €
Licencias	SimScale	100	0	0 €
	OpenFoam	25	0	0 €
	SolidWorks	15	6600€/año	11.3€
	Precio total licencias	140h		11.3 €
Electricidad	Energía consumida PC (0,5kW)	600	0,3071 € kW/h	92,13 €
	Precio total potencia eléctrica	600h		92,13 €
Material	Amortización PC personal	600h / 4 años	950 €	16,26 €
	Precio total material	600h		16,26 €
COSTE TOTAL			10.919,69 €	
COSTE CON GASTOS GENERALES (20%)			13.103,63€	
IVA (21%)			2.751,76 €	
COSTE FINAL DEL PROYECTO			15.855,39 €	

Tabla 4. Desglose del presupuesto del proyecto.

El coste final del proyecto, con las tasas de IVA añadidas, se estima en **15.855,39€**.

10 ANÁLISIS DE LAS IMPLICACIONES AMBIENTALES I SOCIALES

La Fórmula 1 es un deporte que tiene un gran impacto ambiental y en la sostenibilidad del medio ambiente. No solo el consumo de los propios monoplazas, sino incluso su propia fabricación, tienen una influencia importante en la huella de carbono a nivel mundial.

Sin embargo, en lo que concierne a la elaboración de este proyecto en su totalidad, el único consumo del que se ha hecho uso ha sido el de la electricidad para hacer toda la investigación y búsqueda de información, simulaciones CFD, trabajo con CAD y redacción de documentos. Hay que matizar que a la hora de testear el rendimiento aerodinámico de un monoplaza de F1, como ha sido el caso en este estudio, hay claramente una gran diferencia entre realizarlo por simulaciones CFD con métodos numéricos y hacerlo en un túnel de viento oficial a gran escala y usado por equipos de F1. La cantidad de energía y potencia eléctrica necesaria para efectuar las simulaciones en estas últimas instalaciones de gran innovación tecnológica y la elaboración de estas complejas infraestructuras es mucho más grande que no el realizar las simulaciones mediante softwares especializados con métodos numéricos para estimar el comportamiento del flujo en el modelo.

Además, en este proyecto no hay ningún prototipado ni elaboración física de ningún modelo a escala, sino que se trabaja con herramientas CAD, muy útiles para el objeto de esta memoria y cuyo consumo e impacto ambiental es extremadamente bajo. Así pues, la elaboración de este proyecto- en su totalidad teórico y numérico-, dadas las circunstancias y las herramientas empleadas para ejecutarlo, tiene un impacto ambiental ínfimo.

De todas maneras, se puede cuantificar aproximadamente la cantidad de CO₂ que la elaboración de este proyecto ha generado al medio ambiente en la siguiente tabla, teniendo en cuenta que un PC portátil suele consumir por hora encendida aproximadamente 0,2 kg equivalentes de CO₂ [81].

	Tiempo (h)	Potencia (kW)	Energía (kWh)	Emisiones por kWh (kgCO ₂ /kWh)	Emisiones
Ordenador HP Pavilion 15	600	0,5	300	0,2	60 kg CO ₂

Tabla 5. Emisiones de CO₂ del provenientes del consumo eléctrico del ordenador personal.

Como se observa, son 60 kg de emisiones de dióxido de carbono, valor bastante bajo en relación con lo que una simulación en túnel de viento podría llegar a generar, e incluso el prototipado de un modelo de un F1 a escala.



11 CONCLUSIONES FINALES

En el presente estudio se ha podido abordar el fenómeno del marsopeo desde un enfoque teórico en el que se ha explicado con profundidad el desencadenamiento aerodinámico y mecánico de este, partiendo de una base teórica de fundamentos gubernamentales de dinámica y mecánica de fluidos.

Partiendo de la premisa que este fenómeno pilló desprevenido al conglomerado entero de la Fórmula 1 y que su solución no fue ni mucho menos de un día para otro, sino que se tardó meses en comprender el fenómeno, este proyecto ha podido aportar información de relevancia y valor sobre un fenómeno atípico y lejos de ser conocido. Por contrapartida, la información, al ser un tópico muy reciente y novedoso, no ha sido abundante y los artículos, estudios y documentación relacionada escaseaban- habiendo, no obstante, videos de personal bastante cualificado sobre el tema.

Pese a la poca información en forma de artículos, informes o tesis sobre el tema, el enfoque teórico del fenómeno ha sido satisfactorio. En lo que concierne al enfoque práctico, este no era el principal punto de interés del estudio, sino una mera corroboración de una de las soluciones aerodinámicas. Es decir, la simulación CFD de ambos modelos de monoplaça de F1 de 2022 con diferentes alturas de manejo ha servido para afirmar que aumentando la altura de manejo del suelo (especialmente desde atrás) conlleva una pérdida de carga aerodinámica, debido a la relación intrínseca y no-lineal muy sensitiva entre carga y altura de manejo.

Cabe destacar que, tras cuatro años de carrera cursando el grado, no dispongo aun personalmente de los suficientes recursos, conocimientos y herramientas para manejar *softwares* capaces de simular la cinemática de suspensiones de un Fórmula 1, el grado de deflexión de sus componentes en el tiempo, al mismo tiempo que se estudia la frecuencia a la que estos últimos componentes oscilan y varían en el tiempo. Sería, sin embargo, posible realizar un estudio numérico con acoplamiento fluido-estructura, pero ello requeriría unos conocimientos y recursos a nivel de Doctorado o Trabajo de Final de Máster, opción viable en un futuro. Así pues, no se ha podido recrear el fenómeno del marsopeo con una simple simulación CFD, pero se ha podido estudiar el efecto de una de sus posibles soluciones, por lo que la parte práctica ha seguido siendo útil.

Por último, en lo que concierne al trabajo personal, se ha podido completar el proyecto en la planificación prevista según el diagrama de Gantt del Project Charter, pese a que la planificación ha tenido que ser retocada y ha habido algunos puntos del documento Charter modificados de cara a la memoria. La formación en OpenFoam para realizar las simulaciones CFD resultó ser más larga y compleja de lo esperado, con lo que se perdieron semanas de trabajo prevaleciendo la formación, pero tras dos meses sin muchas salidas se escogió trabajar con SimScale, donde la formación era más amena y simple, aparte de que las ventajas de este último sobre OpenFoam eran más atractivas y considerables. Además, al pertenecer al grado de mecánica, durante la carrera nunca he recibido formación directa en simulaciones de CFD y principios de aerodinámica, con lo que este proyecto me ha servido en gran medida para adquirir grandes cantidades de información al respecto que desconocía y a tener un enfoque más claro y directo sobre simulaciones de dinámica de fluidos, además de un entendimiento mucho más claro y efectivo del campo técnico y aerodinámico de la Fórmula 1.

12 REFERÉNCIAS

[1] Formula 1 Glossary [en línea]. Formula 1. Formula One World Championship Limited, 2003 [Consulta, 4 de diciembre de 2022]. Disponible en:

<<<https://www.formula1.com/en/championship/inside-f1/glossary.html>>>

[2] Fluidos (física) [en línea]. Como Funciona [Consulta, 24 de septiembre de 2022]. Disponible en:

<<<https://como-funciona.co/fluidos-fisica/>>>

[3] Modulo 3 fluidos [en línea]. *Universidad de Nebrija*, [Consulta: 24 de septiembre de 2022]. Disponible en:

<<http://www.nebrija.es/~cmalagon/Fisica_Aplicada/transparencias/03-Fluidos/11_-_fluidos.pdf>>

[4] Conceptos generales del flujo de fluidos [en línea]. Entropía [Consulta, 24 de septiembre de 2022]. Disponible en:

<<<https://thermodynamis.wordpress.com/fisica-termodinamica-2/unidad-2-mecanica-de-fluidos/conceptos-generales-del-flujo-de-fluidos>>>

[5] Línea de corriente [en línea]. Wikipedia, 2019 [Consulta, 24 de septiembre de 2022]. Disponible en:

<<https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_de_corriente>>

[6] Flujo laminar [en línea]. Wikipedia, 2022 [Consulta, 25 de septiembre de 2022]. Disponible en:

<<https://es.wikipedia.org/wiki/Flujo_laminar>>

[7] NICK C. *¿Qué es el flujo laminar vs turbulento? Definición* [en línea]. Thermal Engineering, 1 de octubre 2019. [Consulta, 25 de septiembre de 2022]. Disponible en:

<<<https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-flujo-laminar-vs-turbulento-definicion/>>>

[8] MARIO F. Flujo laminar y turbulento [en línea] Aerodinámica F1, 7 de octubre de 2019. [Consulta: 25 de septiembre 2022]. Disponible en:

<<<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/>>



[9] MARIO F. ¿Qué es el número de Mach? [en línea] Aerodinámica F1, 20 de junio de 2021. [Consulta: 26 de septiembre 2022]. Disponible en:

<<<https://www.aerodinamicaf1.com/2021/06/que-es-el-numero-de-mach/>>>

[10] Departamento de física aplicada III. Número de Mach [en línea]. Universidad de Sevilla, 5 de abril de 2010. [Consulta: 26 de septiembre 2022]. Disponible en:

<http://laplace.us.es/wiki/index.php/N%C3%BAmero_de_Mach>

[11] JM DIAZ. Aerodinámica 3: Análisis de la capa límite y el efecto coanda [en línea]. Ángeles en la cabeza, 18 de diciembre de 2017. [Consulta: 27 de septiembre 2022]. Disponible en:

<<http://angelesenlacabeza.blogspot.com/2017/12/aerodinamica-3-analisis-de-la-capa.html>>

[12] GUERRERO A., *Aerodynamic study of the wake effects on a F1 car*. Trabajo de fin de grado, Departamento de ingeniería de vehículos aeroespaciales Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Terrassa, 2020.

[13] JUAN D. CAPA LÍMITE [en línea]. Juan De La Cuerva, 7 de marzo de 2008. [Consulta: 27 de septiembre 2022]. Disponible en:

<<http://juandelacuerva.blogspot.com/2008/03/capa-lmite.html>>

[14] Efecto Coanda [en línea]. Wikipedia, 15 de noviembre 2016. [Consulta: 27 de septiembre 2022]. Disponible en:

<https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Coand%C4%83>

[15] BULMANO N. FENÓMENOS DE TRANSPORTE: CAPA LÍMITE [en línea]. Ingeniería química, 8 de agosto 2021. [Consulta: 27 de septiembre 2022]. Disponible en:

<<https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/08/capa.html>>

[16] UNIVISIÓN. ¿Qué es la aerodinámica? [en línea]. Univisión, 17 de octubre 2014. [Consulta: 30 de septiembre 2022]. Disponible en:

<<https://www.univision.com/explora/que-es-la-aerodinamica>>

[17] Perfil alar [en línea]. Wikipedia, 6 de mayo 2022. [Consulta: 30 de septiembre 2022]. Disponible en:

<https://es.wikipedia.org/wiki/Perfil_alar>

[18] MARIO F. Las fuerzas sobre el monoplaza, drag y lift (o downforce) [en línea]. Aerodinámica F1, 3 de septiembre 2019. [Consulta: 30 de septiembre 2022]. Disponible en:

<<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/las-fuerzas-sobre-el-monoplaza-drag-y-lift-o-downforce/>>

[19] Mundo Aeronáutico. (11 diciembre 2017). Sustentación- Aerodinámica [video]. YouTube. [Consulta: 1 de octubre 2022]. Disponible en:

<<https://www.youtube.com/watch?v=reX9bD-hpXk>>

[20] M OLMO. La Ecuación de Bernoulli [en línea]. Hyperphysics. [Consulta: 30 de septiembre 2022]. Disponible en:

<<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pber.html>>

[21] MARIO F. Perfiles aerodinámicos. ¿Cómo funcionan? [en línea]. Aerodinámica F1, 2 de octubre 2019. [Consulta: 5 de octubre 2022]. Disponible en:

<<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/perfiles-aerodinamicos-como-funcionan/>>

[22] Chain Bear (13 marzo 2018). F1 Aerodynamics - 2: Turbulence, Drag and Vortices [video]. YouTube. [Consulta: 5 de octubre 2022].

<<https://www.youtube.com/watch?v=r5pFyBHO8Fk>>

[23] ABEL C. Vórtices en F1. [en línea]. Lebalap Academy. [Consulta: 5 de octubre 2022]. Disponible en: <<https://lebalap.academy/f1/vortices/>>

[24] DAVID P. ¿Qué es un endplate? [en línea]. Motor, 17 de marzo 2020. [Consulta: 7 de octubre 2022]. Disponible en:

<<https://www.motor.es/noticias/volkswagen-golf-9-adelanto-202291292.html>>

[25] DAVID P. El difusor: un elemento aerodinámico vital [en línea]. Motor, 6 de abril 2015. [Consulta: 7 de octubre 2022]. Disponible en: <<https://www.motor.es/formula-1/el-difusor-un-elemento-aerodinamico-vital-201520754.html>>

[26] Chain Bear (17 marzo 2018). F1 Aerodynamics - 2: Slots, Diffusers, Bargeboards, S-Ducts [video]. YouTube. [Consulta: 7 de octubre 2022]. <https://www.youtube.com/watch?v=WOZgEvJbnlc&t=52s>

[27] MARIO F. Historia de la aerodinámica en la F1 [en línea]. Aerodinámica F1, 15 de septiembre 2019. [Consulta: 10 de octubre 2022]. Disponible en:

<<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/historia-de-la-aerodinamica-en-la-f1/>>

[28] JAVIER P. La evolución de los coches de F1 desde 1950 hasta hoy [en línea]. TopGear, 8 de febrero 2017. [Consulta: 10 de octubre 2022]. Disponible en:

<<https://www.topgear.es/noticias/motorsport/evolucion-coches-f1-1950-hoy-89062>>

[29] Brabham BT46 [en línea]. Wikipedia, 9 de noviembre 2021. [Consulta: 11 de octubre 2022]. Disponible en:

<https://es.wikipedia.org/wiki/Brabham_BT46>



[30] LUÍS M. ¿Cómo ha cambiado la normativa de la F1 a lo largo de la historia? [en línea]. Espíritu Racer, 31 de enero 2021. [Consulta: 13 de octubre 2022]. Disponible en:

<<https://espirituracer.com/reportajes/como-ha-cambiado-la-normativa-de-la-formula-1-a-lo-largo-de-la-historia/>>

[31] El doble difusor o cómo Brawn ganó con picardía [en línea]. Tamburello, 04 de agosto 2020. [Consulta: 13 de octubre 2022]. Disponible en:

<<https://webiltamburello.wordpress.com/2020/08/04/el-doble-difusor-o-como-brawn-gano-con-picardia/>>

[32] MARIO F. El F-Duct (o conducto F en la F1) [en línea]. Aerodinámica F1, 2 de junio 2020. [Consulta: 14 de octubre 2022]. Disponible en:

<<https://www.aerodinamicaf1.com/2020/06/el-f-duct-conducto-f-en-la-formula-1/>>

[33] El difusor soplado [en línea]. F1aldia, 19 de julio 2011. [Consulta: 14 de octubre 2022]. Disponible en: <<https://www.f1aldia.com/12578/el-difusor-soplado/>>

[34] Halo (automovilismo) [en línea]. Wikipedia, 18 de agosto 2022. [Consulta: 14 de octubre 2022]. Disponible en: <[https://es.wikipedia.org/wiki/Halo_\(automovilismo\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Halo_(automovilismo))>

[35] Drag Reduction System [en línea]. Wikipedia, 18 de marzo 2022. [Consulta: 14 de octubre 2022]. Disponible en:

<https://es.wikipedia.org/wiki/Aler%C3%B3n_trasero_m%C3%B3vil>

[36] ANALYSIS: What is 'porpoising' – and why is it causing the F1 teams a headache at 2022 pre-season running? [en línea]. FORMULA 1, 24 de febrero 2022. [Consulta: 20 de octubre 2022]. Disponible en:

<<https://www.formula1.com/en/latest/article.analysis-what-is-porpoising-and-why-is-it-causing-the-f1-teams-a-headache-at.6O93LlvFMyy81L9LfSutcS.html>>

[37] Abel Caro (28 febrero 2022). ¿Porpoising en F1? Analizamos este fenómeno [video]. YouTube. [Consulta: 20 de octubre 2022].

<https://www.youtube.com/watch?v=i8_u9C81O8c>

[38] KYLE.ENGINEERS (20 mayo 2022). How does porpoising work? - F1 Aero explained [video]. YouTube. [Consulta: 20 de octubre 2022].

<<https://www.youtube.com/watch?v=5a4sBF3s0UI&t=9s>>

[39] Histéresis [en línea]. Wikipedia, 12 de febrero 2022. [Consulta: 24 de octubre 2022]. Disponible en: <<https://ca.wikipedia.org/wiki/Hist%C3%A8resi>>

[40] CHINDAMO D, GADOLA M, MAGRI P, SANDRINI G., *Analyzing Porpoising on High Downforce Race Cars: Causes and Possible Setup Adjustments to Avoid It*. Artículo *Energies*, Universidad de Brescia, 6 de septiembre de 2022.

[41] JAKE B. Gary Anderson explains new Mercedes F1 suspension part [en línea]. Autosport, 27 de septiembre 2019. [Consulta: 4 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.autosport.com/f1/news/gary-anderson-explains-new-mercedes-f1-suspension-part-4988177/4988177/>>

[42] CHRISTOPH H. Hydraulic decoupled suspension – the journey starts with a bold idea [en línea]. MathWorks, 1 de febrero 2018. [Consulta: 4 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://blogs.mathworks.com/student-lounge/2018/02/01/hydraulic-decoupled-suspension-part1/>>

[43] FIA. 2022 Formula 1 Sporting Regulations [en línea]. FIA, 29 abril 2022. [Consulta: 6 noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.fia.com/sites/default/files/formula_1_sporting_regulations_-_2022_-_iss_6_-_2022-04-29.pdf>

[44] FIA. 2022 Formula 1 Technical Regulations [en línea]. FIA, 19 febrero 2021. [Consulta: 6 noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.fia.com/sites/default/files/2022_formula_1_technical_regulations_-_iss_3_-_2021-02-19.pdf>

[45] KYLE.ENGINEERS (9 Julio 2022). How porpoising was caused by the 2022 F1 rules? [video]. YouTube. [Consulta: 7 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=kFzP65XuNsc>

[46] RAÚL M. Informe técnico: análisis del reglamento 2022 [en línea]. Soy Motor, 14 de enero 2022. [Consulta: 8 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://soymotor.com/articulos/informe-tecnico-analisis-del-reglamento-2021-970813>>

[47] Sinusoidal function calculator [en línea]. KioDigital [Consulta: 11 noviembre 2022]. Disponible en: <<https://kiodigital.net/sinusoidal-function-calculator/>>

[48] Formula 1 (19 junio 2022) .What Steps Are The FIA Taking To Tackle Porpoising? | F1 TV Tech Talk | Crypto.com [en línea]. YouTube. [Consulta: 15 noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.youtube.com/watch?v=bJpT8p7fv1k>>

[49] MARK H. TECH TUESDAY: Which teams have found a solution to porpoising ahead of the Bahrain Grand Prix? [en línea]. FORMULA 1, 15 de marzo 2022. [Consulta: 15 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.formula1.com/en/latest/article.tech-tuesday-which-teams-have-found-a-solution-to-porpoising-ahead-of-the.645e6AosNKxsT4wU3Mmhkt.html>>



[50] MARK H. TECH TUESDAY: Why gearbox layout could be key to solving the porpoising puzzle [en línea]. FORMULA 1, 12 de abril 2022. [Consulta: 15 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.formula1.com/en/latest/article.tech-tuesday-why-the-gearbox-layout-could-be-key-to-solving-the-porpoising.70jyq6WLn2OpvXsoXdIwQE.html>>

[51] MARK H. TECH TUESDAY: Have Mercedes finally cracked their porpoising issue with Barcelona upgrade package? [en línea]. FORMULA 1, 24 de mayo 2022. [Consulta: 15 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.formula1.com/en/latest/article.tech-tuesday-have-mercedes-finally-cracked-their-porpoising-issue-with.7lwHXGVRwKxk4w1v1gIT7h.html>>

[52] MARK H. TECH TUESDAY: TECH TUESDAY: The clever Red Bull underfloor that has made porpoising less of a problem on the RB18 [en línea]. FORMULA 1, 14 de junio 2022. [Consulta: 16 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.formula1.com/en/latest/article.tech-tuesday-the-clever-red-bull-underfloor-that-has-made-porpoising-less-of.7EbdEh2AlOnKqBebMJPZqF.html>>

[53] MARK H. TECH TUESDAY: TECH TALK: Explaining the latest Technical Directives – and what they mean for porpoising [en línea]. FORMULA 1, 5 de agosto 2022. [Consulta: 14 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.formula1.com/en/latest/article.tech-talk-explaining-the-latest-technical-directives-and-what-they-mean-for.1F8o8goLVT6TjkO3eNRDKZ.html>>

[54] MARK H. Teams insist new anti-porpoising Technical Directive 'not a major issue' ahead of Belgian GP [en línea]. FORMULA 1, 24 de agosto 2022. [Consulta: 14 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.formula1.com/en/latest/article.teams-insist-new-anti-porpoising-technical-directive-not-a-major-issue-ahead.30SVIIXhQoIFnofsKPNXnS.html>>

[55] Formula 1 (29 mayo 2022). Porpoising: ¿Who Has Fixed It? | F1 TV Tech Talk | Crypto.com [en línea]. YouTube. [Consulta: 16 noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.youtube.com/watch?v=v8Fg7rFyZxA>>

[56] Formula 1 (6 septiembre 2022). Keeping Track Of Porpoising | F1 TV Tech Talk | Crypto.com [en línea]. YouTube. [Consulta: 16 noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.youtube.com/watch?v=UeQ3yC7Du8A>>

[57] Formula 1 (23 julio 2022). New Rules To Combat Porpoising | F1 TV Tech Talk | Crypto.com [en línea]. YouTube. [Consulta: 16 noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.youtube.com/watch?v=troEfX2xU7g>>

[58] Newey, A., *How to build a car*. Harper Collins, Reino Unido, segunda edición, 2017.

[59] Bauza, A., *Performance and improvements of a Formula 1 car*. Trabajo de fin de grado, UPC, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Terrassa, 2022.

[60] MATTHEW S. Así son las impactantes mejoras de Mercedes para el GP de España [en línea]. FORMULA 1, 19 de mayo 2022. [Consulta: 15 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://es.motorsport.com/f1/news/mercedes-mejoras-espana-detalle-2022/10306749/>>

[61] Diagrama de cajas [en línea] Wikipedia, 1 junio 2022. [Consulta: 16 noviembre 2022]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_caja>

[62] El jefe de Mercedes, preocupado por la salud de Hamilton: "Puede sufrir daño cerebral" [en línea]. TycSports, 6 de agosto 2022. [Consulta: 18 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://www.tycsports.com/automovilismo/el-jefe-de-mercedes-preocupado-por-la-salud-de-hamilton-puede-sufrir-dano-cerebral-id455323.html>

[63] DAVID P. Russell teme por su salud tras sufrir porpoising extremo en el Mercedes [en línea]. Motor, 25 de abril 2022. [Consulta: 18 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.motor.es/formula-1/russell-salud-porpoising-extremo-mercedes-f1-202286520.html>>

[64] RAYMOND B. Sid Watkins ya documentó las secuelas físicas del porpoising hace 40 años [en línea]. SoyMotor, 16 de junio 2022. [Consulta: 18 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://soymotor.com/blogs/rblancafort/sid-watkins-ya-documento-las-secuelas-fisicas-del-porpoising-hace-40-anos>>

[65] SPORTYOU. Médicos expertos avisan de los problemas de salud a largo plazo que provoca el rompecuellos del 'porpoising' [en línea]. 20minutos, 1 de abril 2022. [Consulta: 18 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.20minutos.es/deportes/noticia/4980197/0/medicos-avisan-problemas-salud-porpoising-formula1/>>

[66] JOSÉ L. Carlos Sainz denuncia que el 'porpoising' está afectando a la salud de los pilotos [en línea]. Thebestf1, 21 de mayo 2022. [Consulta: 18 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.thebestf1.es/carlos-sainz-denuncia-que-el-porpoising-esta-afectando-a-la-salud-de-los-pilotos/>>

[67] MARIO G. Cómo el porpoising puede ser un problema de salud para la F1 [en línea]. Motorsport, 3 de mayo 2022. [Consulta: 18 de noviembre 2022]. Disponible en: <https://es.motorsport.com/f1/news/como-porpoising-problema-salud-enfermedad-mental-formula1/10247296/>

[68] DAVID P. La nueva ley antiporpoising (y más cambios) para la F1 de 2022 y 2023, al detalle [en línea]. Motor, 17 de agosto 2022. [Consulta: 16 de noviembre 2022]. Disponible



en: <<https://www.motor.es/formula-1/nueva-ley-antiporpoising-mas-cambios-reglamento-f1-202289123.html>>

[69] ABEL C. CFD (Computational Fluid Dynamics) [en línea]. Lebalap Academy, 29 abril 2020. [Consulta: 19 noviembre 2022]. Disponible en: <<https://lebalap.academy/f1/simulacion-cfd/>>

[70] SimScale [en línea]. FrWiki.wiki [Consulta: 19 noviembre 2022]. Disponible en: <<https://es.frwiki.wiki/wiki/SimScale>>

[71] Incompressible Fluid [en línea]. SIMSCALE, 10 de octubre 2022. [Consulta: 19 de noviembre 2022]. Disponible en: <[Incompressible Fluid Flow Analysis | Analysis Types | SimScale](#)>

[72] Global Settings [en línea]. SIMSCALE, 5 de septiembre 2022. [Consulta: 21 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/>>

[73] Simulation Control for fluid analysis [en línea]. SIMSCALE, 25 de octubre 2022. [Consulta: 21 de noviembre 2022]. Disponible en: <<https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/simulation-control-fluid/>>

[74] ALBERTO R. Análisis técnico- Gurney Flap [en línea]. Albrodulp1, 19 de mayo 2014. [Consulta: 11 de octubre 2022]. Disponible en: <<https://albrodulp1.wordpress.com/2014/05/19/analisis-gurney-flap/>>

[75] How to create Flow volume extraction [en línea]. SIMSCALE, 19 diciembre 2019. [Consulta: 21 de noviembre 2022]. Disponible en:
<https://www.simscale.com/knowledge-base/flow-volume-extraction/?_gl=1*1pxj3wk*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQiAtICdBhCLARIsALUBFcGiOYKemx3uYIS0pd06LbyvEhjh3JaS53Jz1UHqi2NxlHtRV6RovVUaAnRREALw_wcB>

[76] Hex-dominant [en línea]. SIMSCALE, 9 de septiembre 2022. [Consulta: 21 de noviembre 2022]. Disponible en:
<<https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/meshing/hex-dominant/>>

[77] Mesh-Quality [en línea]. SIMSCALE, 12 de septiembre 2022. [Consulta: 23 de noviembre 2022]. Disponible en:
<<https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/meshing/mesh-quality/>>

[78] How to keep the Courant Number below 1? [en línea]. SIMSCALE, 10 de febrero 2020. [Consulta: 13 de noviembre 2022]. Disponible en:

<https://www.simscale.com/knowledge-base/what-is-a-courant-number/>

[79] How to check and improve Mesh-quality? [en línea]. SIMSCALE, 20 de mayo 2020. [Consulta: 20 de noviembre 2022]. Disponible en:

<https://www.simscale.com/knowledge-base/how-to-check-and-improve-mesh-quality/>

[80] Peter Windsor (15 abril 2022). Taming the F1 bouncers: Scarbs analysis by Peter Windsor [en línea]. YouTube. [Consulta: 17 agosto 2022]. Disponible en:

<https://www.youtube.com/watch?v=0tF7TFxBDfU>

[81] Ecoembes, Los ordenadores también emiten CO2 [en línea]. Thecircularlab, 12 de abril 2016. [Consulta: 26 de diciembre 2022]. Disponible en:

<https://www.thecircularlab.com/los-ordenadores-tambien-emiten-co2/>

[82] Chris Greenshields, Open Foam Linux guide [en línea]. CFD Direct, 1 de octubre 2016. [Consulta: 26 de septiembre 2022]. Disponible en:

<https://cfd.direct/openfoam/linux-guide/>

[83] Chris Greenshields, Download V9 Ubuntu [en línea]. OpenFoam, 20 de julio 2021. [Consulta: 26 de septiembre 2022]. Disponible en:

<https://openfoam.org/download/9-ubuntu/>

[84] Holzmann, T., *Mathematics, Numerics, Derivations and Open Foam* [en línea]. Holzmann CFD, 13 de julio de 2020. [Consulta: 7 de septiembre de 2022]. Disponible en:

<https://Holzmann-cfd.com>

[85] Oswin Valle, Limitaciones en el uso de la ecuación de Bernoulli [en línea]. Studocu. [Consulta: 9 de enero de 2023]. Disponible en:

<https://www.studocu.com/gt/document/universidad-francisco-marroquin/derecho/limitaciones-en-el-uso-de-la-ecuacion-de-bernoulli-compress/29327998>

