



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO NUMÉRICO DEL EFECTO DE MODIFICACIONES SOBRE LA
AERODINÁMICA DE UN AUTOMÓVIL COMERCIAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

NICOLÁS ANDRE LEPIN SEPÚLVEDA

PROFESOR GUÍA:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

PROFESOR CO-GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

COMISIÓN:
REYNALDO CABEZAS CIFUENTES

SANTIAGO DE CHILE
2023

ESTUDIO NUMÉRICO DEL EFECTO DE MODIFICACIONES SOBRE LA AERODINÁMICA DE UN AUTOMÓVIL COMERCIAL

Debido a las interacciones entre la carrocería de un vehículo en movimiento y el aire a través del cual circula, se generan diferentes fuerzas que puede provocar efectos no deseados sobre el automóvil. La alteración de la geometría original puede modificar estas fuerzas para buscar diferentes efectos como la reducción de la energía necesaria para avanzar o mejorar el contacto con la vía de circulación. De esto surge la ciencia de la aerodinámica, la cual estudia las interacciones entre el flujo de aire y un vehículo en movimiento. Durante las últimas décadas, la aplicación de *Computer Fluid Dynamics* ha permitido acelerar este proceso permitiendo hacer simulaciones de un vehículo para obtener su rendimiento aerodinámico durante las etapas de diseño.

El objetivo de este trabajo es utilizar CFD para estudiar el efecto que la aplicación de diferentes modificaciones genera sobre la aerodinámica de un vehículo común en un rango de velocidades permitidas en las calles. Se diseña una geometría simplificada en base a un automóvil sedán mediante software *Computer Aided Design* para luego utilizar el software Ansys, simulando el entorno de un vehículo y sus contrapartes con las modificaciones instaladas dentro de un túnel de viento extenso para obtener los resultados numéricos del estado de fuerzas y los respectivos coeficientes, en conjunto a parámetros que visualicen el comportamiento del flujo en velocidades de 60, 80, 100 y 120 [km/h].

De los resultados, se obtiene que los dispositivos y sus combinaciones afectan a la interacción sobre el flujo incluso a baja velocidad, pero la magnitud del efecto producido varía según la velocidad. Es importante notar que los resultados indican que el efecto resultante al utilizar 2 modificaciones no equivale a la suma de los efectos numéricos sobre fuerzas, sino que el efecto debe ser estudiado en conjunto con los resultados que permitan visualizar la alteración al flujo de aire.

Respecto al objetivo principal, el análisis llevado a cabo permite destacar los 3 casos que generen un mejor efecto sobre la aerodinámica. La instalación de un difusor curvo se orienta a la disminución del coeficiente de arrastre, con un promedio de un 0,24 %. La aplicación de un difusor curvo y un alerón *spoiler* a la vez, disminuyen sustancialmente las fuerzas de sustentación con una media de 77,4 %, pero con un fuerte aumento de un 14,3 % sobre las fuerzas de arrastre. Por último, se tiene el caso del uso de un difusor curvo y alerón alar, cuya aplicación en conjunto genera una considerable disminución de las fuerzas verticales netas en un 68,5 % con un menor aumento a las fuerzas opuestas al movimiento de un 6,2 %, presentando así una buena opción si se desea un vehículo con mejor control, pero el consumo de energías es una preocupación.

Adicionalmente, se dan ciertas propuestas que pueden complementar el estudio: la utilización de geometrías más complejas y la consideración de otros criterios externos a la aerodinámicos que pueden afectar la decisión de una implementación final.

*Se terminó el día
Ha llegado la hora
Peleaste duro
Y ganaste la guerra
Puedes haberlo hecho mal
Pero diste lo mejor de ti
...
Ahora es tiempo de descansar.*

Agradecimientos

Antes que todo me gustaría agradecer y dar un fuerte reconocimiento a mi familia, especialmente a mi papá y mi mamá, quiénes han sido un pilar fundamental durante mi transcurso por la universidad, es más, en toda la vida, siempre apoyándome, teniéndome infinita paciencia y siempre estar ahí en los momentos en que la pasé más mal (Si, esto incluye a nuestras mascotas). Sé que somos bastante diferentes y no siempre nos vemos ojo a ojo, pero créanme que de verdad los quiero mucho.

No menores son los agradecimientos a los energúmenos que tengo por amigos, a la Flojera Guerrero y a Sidonia, con los cuales cualquier persona ajena pensaría que nos odiamos a muerte, a TIM, a PG y al resto de gente que no sé cómo agrupar. Gracias por todas las risas, rabias, noches de estudios, noches de lolcito, proyectos que mueren en una semana y completos en Gorbea. La verdad la vida sin ustedes no sería ni la décima parte de lo entretenida; sé que veces los presiono mucho y llego a ser bastante irritante, pero es mi forma de preocuparme y mostrar cariño respectivamente.

También tengo que agradecer, y a la vez pedir perdón, a todas las personas que me tuvieron que aguantar durante mi estadía en la Universidad. Sé que muchas veces los puse nerviosos preguntando en que iba el trabajo para apurar, o avanzando en los trabajos a las 4 de la mañana, o intentando hacer las cosas a mi manera para probar un punto, o preguntando cosas nada que ver en clases, o preguntar cosas innecesarias a los ayudantes y mil cosas más. Me gustaría agradecer a la comisión conformadora de mi trabajo, especialmente al profesor Valencia, quién siempre estuvo dispuesto a dedicarme un tiempo a responderme cualquier duda por muy pequeña que fuera.

La verdad, nunca pensé que llegaría tan lejos. No lo pensé mucho y me dejé llevar, no hice planes y siempre tendré la duda de como hubiera sido mi vida de hacer otra cosa, pero supongo que pasaría lo mismo del otro lado. Me gusta desarmar y armar cosas y supongo que eso tiene que ver con Mecánica, aunque no soy muy bueno y generalmente termino destruyéndolas, pero me mantiene entretenido; ahora que lo pienso, lo heredé de mi papá.

No estoy muy seguro de cual es el siguiente paso o cuál es mi lugar ahora, pero no es problema alguno. Si hay algo de lo que estoy seguro, es que voy a dormir por un mes decorrido, después de 6 años creo que es bastante merecido.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivos Específicos	4
1.3. Alcances	4
2. Antecedentes	5
2.1. Principios y conceptos	5
2.1.1. Principio de Bernoulli	5
2.1.2. Efecto Venturi	6
2.1.3. Fuerzas aerodinámicas	8
2.1.4. Coeficientes Aerodinámicos	9
2.2. Alerones	10
2.2.1. Parámetros de diseño de alerones	10
2.3. Difusores	12
2.3.1. Parámetros de diseño de difusores	12
2.4. Aplicación de CFD en la aerodinámica	13
2.5. Modelos y ecuaciones	14
2.5.1. Conservación de Masa	14
2.5.2. Ecuaciones de Navier Stokes	15
2.5.3. Modelo para turbulencias	15
2.5.4. Ley de Pared	15
2.6. Fenómenos aerodinámicos	18
2.7. Números adimensionales	20
2.7.1. Número de Reynolds	20
2.7.2. Número Mach	21
2.8. Límites de velocidades en Chile	21
3. Metodología	22
3.1. Recursos	23
4. Desarrollo	24
4.1. Modelos CAD	24
4.1.1. Modelado de Alerones	26
4.1.2. Modelado de Difusores	27
4.1.3. Modelos utilizados	28
4.2. Numeros Adimensionales	30
4.3. Configuración del Dominio	31

4.4.	Estudio de Independencia del Mallado	33
4.4.1.	Configuración de Ansys	35
4.4.2.	Resultados Independencia de Malla	37
4.5.	Estudio temporal del régimen	39
4.5.1.	Resultados estudio temporal del régimen	40
4.6.	Configuración Final	42
5.	Resultados	45
5.1.	Vehículo Base	45
5.2.	Vehículo con Difusor Recto	54
5.3.	Vehículo con Difusor Curvo	57
5.4.	Vehículo con alerón spoiler	60
5.5.	Vehículo con alerón alar	62
5.6.	Vehículo con alerón spoiler y difusor recto	66
5.7.	Vehículo con alerón spoiler y difusor curvo	68
5.8.	Vehículo con alerón alar y difusor recto	71
5.9.	Vehículo con alerón alar y difusor curvo	74
6.	Análisis de resultados	78
6.1.	Vehículo Base	78
6.2.	Efecto de los dispositivos	80
6.2.1.	Difusor recto	80
6.2.2.	Difusor curvo	81
6.2.3.	Alerón spoiler	82
6.2.4.	Alerón Alar (Wing)	82
6.3.	Efecto e interacción de múltiples dispositivos	83
6.3.1.	Alerón spoiler y difusor recto	83
6.3.2.	Alerón spoiler y difusor curvo	84
6.3.3.	Alerón alar (Wing) y difusor recto	84
6.3.4.	Alerón alar (Wing) y difusor curvo	85
6.3.5.	Análisis global	85
7.	Conclusiones	91
	Bibliografía	92
	Anexos	95
A.	Vistas del vehículo utilizado como referencia	95
B.	Datos vehículo utilizado como referencia	96
C.	Estudio independencia de mallado	97
D.	Estudio de Régimen	98
E.	Detalle de Resultados	100
E.1.	Vehículo base	100
E.2.	Vehículo con alerón spoiler y difusor recto	101
E.3.	Estudio con modelo con elementos mecánicos	108

Índice de Tablas

2.1.	Configuración usada para el estudio de la altura de alerones [3]	11
2.2.	Descripción de condiciones de borde	14
4.1.	Parámetros del vehículo	30
4.2.	Números adimensionales en el problema	30
4.3.	Descripción de condiciones de borde	33
4.4.	Selección de opciones de Inflation	34
4.5.	Resumen de Mallas	35
4.6.	Valores de referencia para el vehículo con alerón	36
4.7.	Configuración de Run Calculation	37
4.8.	Comparación de resultados en Dirección Z	37
4.9.	Comparación de resultados en Dirección Y	37
4.10.	Resultados de estudio régimen estacionario	41
4.11.	Valores de referencia generales	43
4.12.	Selección de apartado <i>Selection Methods</i>	43
4.13.	Configuración de Run Calculation	44
5.1.	Mallado del modelo base	45
5.2.	Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo base	46
5.3.	Métricas de malla del modelo con difusor recto	54
5.4.	Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con difusor recto	54
5.5.	Métricas de malla del modelo con difusor curvo	57
5.6.	Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con difusor curvo	57
5.7.	Métricas de malla con alerón spoiler	60
5.8.	Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con alerón spoiler	60
5.9.	Métricas de malla en modelo con alerón alar	63
5.10.	Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con alerón alar	63
5.11.	Métricas de malla del modelo con alerón spoiler y difusor recto	66
5.12.	Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con alerón spoiler y difusor recto	66
5.13.	Métricas de malla del modelo con alerón spoiler y difusor curvo	69
5.14.	Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con alerón spoiler y difusor curvo	69
5.15.	Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con alerón alar y difusor recto	72
5.16.	Métricas de malla del modelo con alerón alar y difusor recto	72
5.17.	Métricas de malla del modelo con alerón alar y difusor curvo	74
5.18.	Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con alerón alar y difusor curvo	75
6.1.	Diferencias porcentuales del coeficiente de arrastre respecto al caso base	87
6.2.	Diferencias porcentuales de fuerzas de sustentación respecto al caso base	88
E.1.	Métricas del mallado del vehículo con difusor recto y elementos mecánicos	109
E.2.	Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo del vehículo con difusor recto y elementos mecánicos	109

Índice de Ilustraciones

1.1.	Evolución de los coeficientes de arrastre en automóviles a través de los años [9]	1
1.2.	Vehículos diseñados para un menor coeficiente de arrastre	2
1.3.	Tecnologías de transformación aerodinámica	3
2.1.	Efecto del principio de Bernoulli en alerones	6
2.2.	Tubo de Venturi, donde la presión ha sido representada por la diferencia de la altura de la columna de agua	6
2.3.	Aceleración del flujo en la parte inferior del vehículo [22]	7
2.4.	Evolución de la presión bajo la parte inferior de un vehículo con difusor y en un tubo de Venturi [17]	7
2.5.	Fuerzas aerodinámicas presentes durante el movimiento de un automóvil [22]	8
2.6.	Representación del área transversal [22]	9
2.7.	Modelo de alerón bajo <i>Spoiler</i>	10
2.8.	Evolución de Fuerza de arrastre (F_x) y Fuerza de sustentación (F_y) de un mismo alerón para diferentes ángulos de ataque [6]	11
2.9.	Relación de altura y fuerza generadas en alerones	11
2.10.	Divisiones interiores de un difusor y su efecto	13
2.11.	Modelos en estudios CFD	13
2.12.	Esquema de condiciones de borde [23]	14
2.13.	Perfil de velocidades	16
2.14.	Altura del punto a estudiar y el efecto de esta altura sobre la ecuación a utilizar	16
2.15.	Esquema de región de estela [14]	18
2.16.	Ejemplos de líneas de flujo	19
2.17.	Contorno de energía cinética turbulenta en la estela de un vehículo	19
2.18.	Vorticidad de turbulencias en un vehículo	20
2.19.	Iso-Contorno de Q-Criterion en un vehículo [15]	20
4.1.	Posición de las vistas iniciales	24
4.2.	Cuerpo resultante de aplicar loft	25
4.3.	Cuerpo resultante de la intersección de las extrusiones	25
4.4.	Cuerpo resultante de la intersección de las extrusiones	26
4.5.	Modelo de alerón alto <i>Wing</i>	26
4.6.	Modelo de alerón <i>Spoiler</i>	27
4.7.	Modelo del Difusor Recto	27
4.8.	Elementos de diseño de Difusor Curvo	28
4.9.	Modelo del Difusor Curvo	28
4.10.	Modelos del vehículo	29
4.11.	Arreglos de zonas problemáticas	30
4.12.	Definición de planos de referencia	31
4.13.	Dominio utilizado para el estudio de independencia	32

4.14.	<i>Named Selections</i> en el dominio	32
4.15.	Cuerpos de Influencia en el dominio	33
4.16.	Mallas utilizadas para el estudio de independencia	35
4.17.	Elementos problemáticos en alerón	38
4.18.	Zonas de calidad media baja	38
4.19.	Contorno de velocidad en mejor malla	39
4.20.	Resultados gráficos simulación estacionaria de 1000 iteraciones	40
4.21.	Convergencia según iteraciones	41
4.22.	Contorno de velocidad en régimen estacionario	41
4.23.	Dimensiones finales del dominio	42
5.1.	Métricas de malla del dominio del vehículo base	45
5.2.	Contornos de velocidad alrededor del vehículo base	46
5.3.	Contornos de presión alrededor del vehículo base	47
5.4.	Contornos de velocidad alrededor del vehículo base	48
5.5.	Líneas de flujo horizontales alrededor del vehículo base	49
5.6.	Líneas de flujo 3D y en difusor en vehículo base	50
5.7.	Turbulencias según Q-Criterion en el vehículo base	51
5.8.	Vorticidad de turbulencias en el vehículo base	52
5.9.	Vorticidad de turbulencias en el vehículo base	53
5.10.	Mallado del dominio del vehículo con difusor recto	54
5.11.	Resultados gráficos del vehículo con difusor recto a 100 [km/h]	55
5.12.	Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con difusor recto a 100 [km/h]	56
5.13.	Mallado del dominio del vehículo con difusor curvo	57
5.14.	Resultados gráficos del vehículo con difusor curvo a 100 [km/h]	58
5.15.	Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con difusor curvo a 100 [km/h]	59
5.16.	Mallado del dominio del vehículo con alerón spoiler	60
5.17.	Resultados gráficos del vehículo con alerón spoiler a 100 [km/h]	61
5.18.	Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con alerón spoiler a 100 [km/h]	62
5.19.	Mallado del dominio del vehículo con alerón alar	62
5.20.	Resultados gráficos del vehículo con alerón alar a 100 [km/h]	64
5.21.	Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con alerón alar a 100 [km/h]	65
5.22.	Mallado del dominio del vehículo con alerón spoiler y difusor recto	66
5.23.	Resultados gráficos del vehículo con alerón spoiler y difusor recto a 100 [km/h]	67
5.24.	Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con alerón spoiler y difusor recto a 100 [km/h]	68
5.25.	Mallado del dominio del vehículo con alerón spoiler y difusor curvo	68
5.26.	Resultados gráficos del vehículo con alerón spoiler y difusor curvo a 100 [km/h]	70
5.27.	Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con alerón spoiler y difusor curvo a 100 [km/h]	71
5.28.	Mallado del dominio del vehículo con alerón alar y difusor recto	71
5.29.	Resultados gráficos del vehículo con alerón alar y difusor recto a 100 [km/h]	73
5.30.	Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con alerón alar y difusor recto a 100 [km/h]	74
5.31.	Mallado del dominio del vehículo con alerón alar y difusor curvo	74
5.32.	Resultados gráficos del vehículo con alerón alar y difusor curvo a 100 [km/h]	76
5.33.	Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con alerón alar y difusor curvo a 100 [km/h]	77

6.1.	Coeficiente de arrastre y número de Reynolds [21]	79
6.2.	Modelo y mallado del dominio del vehículo con elementos mecánicos y difusor recto	81
6.3.	Resultados gráficos del vehículo con difusor recto y elementos mecánicos a 100 [km/h]	81
6.4.	Gráfica de evolución de coeficiente de arrastre de las modificaciones individuales . .	86
6.5.	Gráfica de evolución de fuerzas de sustentación de las modificaciones individuales . .	87
6.6.	Gráfica de evolución de coeficiente de arrastre de las combinaciones de modificaciones	88
6.7.	Gráfica de evolución de fuerzas de sustentación de las combinaciones de modificaciones	89
A.1.	Dimensiones de Hyundai Elantra 2021	95
B.1.	Extracto de catálogo de Hyundai Elantra 2021	96
C.1.	Mallas utilizadas para el estudio de independencia	97
C.2.	Convergencia estudio de independencia	98
D.1.	Resultados de simulación de 1000 iteraciones bajo régimen estacionario	99
D.2.	Resultados de simulación de 5000 iteraciones bajo régimen estacionario	99
E.1.	Convergencia estudio de independencia	100
E.2.	Contornos de velocidad alrededor del vehículo con alerón spoiler y difusor recto . . .	101
E.3.	Contornos de presión alrededor del vehículo con alerón spoiler y difusor recto	102
E.4.	Contornos de presión en la carrocería del vehículo con alerón spoiler y difusor recto .	103
E.5.	Líneas de flujo horizontales alrededor del vehículo con alerón spoiler y difusor recto	104
E.6.	Líneas de flujo 3D y en difusor en vehículo con alerón spoiler y difusor recto	105
E.7.	Turbulencias según Q-Criterion en el vehículo con alerón spoiler y difusor recto . . .	106
E.8.	Vorticidad de turbulencias en el vehículo con alerón spoiler y difusor recto	107
E.9.	Vorticidad de turbulencias en el vehículo con alerón spoiler y difusor recto	108
E.10.	Modelo y mallado del dominio del vehículo con elementos mecánicos y difusor recto	109
E.11.	Resultados gráficos del vehículo con difusor recto y elementos mecánicos a 100 [km/h]	110
E.12.	Resultados gráficos del turbulencias vehículo con difusor recto y elementos mecáni- cos a 100 [km/h]	111
E.13.	Detalles en la parte inferior a 100 [km/h]	111

Capítulo 1

Introducción

La aerodinámica es la rama de la ciencia de mecánica de fluidos que estudia las relaciones entre un cuerpo sólido en movimiento y el fluido que compone su ambiente. Los desarrollos de esta ciencia han permitido que el ser humano sea capaz de avanzar rápidamente en el desarrollo de medios de transporte, siendo la ciencia vital de los principios de vuelo de aeronaves y tomando un rol elemental en la industria automotriz.

Durante las primeras décadas de la industria automotriz se creía que la mejor forma de aumentar la velocidad máxima de un vehículo residía en su sistema de potencia, pero a medida que se aumentaban las velocidades, los ingenieros se percataron que vehículos con formas más alargadas y parecidas a una gota de agua presentaban una menor dificultad para alcanzar altas velocidades, y así se desató la carrera aerodinámica. Con los años, la implementación de diseños aerodinámicos se estableció de manera universal, cambiando drásticamente las carrocerías hasta las que se pueden apreciar en tiempos modernos.

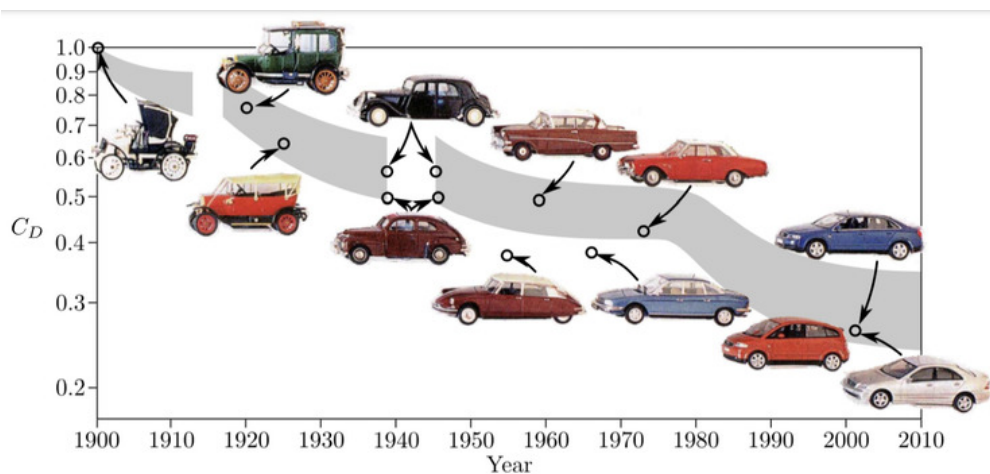


Figura 1.1: Evolución de los coeficientes de arrastre en automóviles a través de los años [9]

Un vehículo con una buena aerodinámica puede traer consigo grandes beneficios, llegando a existir vehículos diseñados específicamente para ser lo más aerodinámico posible, haciendo uso de modificaciones de una complejidad y costo no muy alto. Estos beneficios incluyen:

- Disminución de consumo de combustible: Una adecuada aerodinámica puede reducir la ener-

gía necesaria para atravesar el aire, por lo que se requiere de una menor potencia para circular, lo que a su vez se traduce en un ahorro de combustible que resulta importante entre más distancia se recorre.

- Mayores velocidades: Otro efecto de la aerodinámica es el producir fuerzas que mejoran la adherencia de un vehículo al piso, incrementando su agarre y permitiendo recorrer curvas a mayor velocidad [6]. Por otro lado, esto a su vez permite alcanzar mayores velocidades sin aumentar la potencia del motor.
- Mejora del control: Con un mejor contacto con el pavimento y la disminución de turbulencias, mejora el control del vehículo, ayudando con fenómenos como el sobreviraje¹. También incrementa levemente la eficiencia de los frenos debido al balance de fuerzas [11].

Buscando ganar el máximo de estos beneficios, los fabricantes han diseñado automóviles específicamente dedicados a disminuir las fuerzas generadas por el aire, resultando en vehículos como el *Citroen CX* o el *Mclaren Speedtail*, dos vehículos de segmentos y épocas diferentes diseñados con el mismo propósito.



(a) *Citroen CX*



(b) *Mclaren Speedtail*

Figura 1.2: Vehículos diseñados para un menor coeficiente de arrastre

1.1. Motivación

Actualmente, el estudio de la aerodinámica es una gran prioridad para los fabricantes de automóviles, invirtiendo grandes cantidades de recursos, tanto en estudios como instalaciones, para buscar mejoras en la aerodinámica de un modelo. Un avance importante durante los últimos años es el uso de CFD (*Computational Fluids Dynamics*) durante las etapas de diseño, el cual permite resolver las ecuaciones que rigen el aire circulante alrededor de un vehículo y así simular por computadora el comportamiento del aire frente al vehículo, reduciendo recursos y tiempos necesarios que de otra manera se utilizarían en pruebas experimentales.

Aparte del diseño inicial en la geometría de la carrocería de un automóvil, existen diferentes maneras de mejorar la aerodinámica de un vehículo, algunas bastante simples y de bajo costo de implementación, y otras bastante complejas cuyo uso de momento solo está reservado para competiciones. Las implementaciones más comunes son:

- Difusores: Son dispositivos que crean una zona que gradualmente aumenta el volumen en la parte posterior del vehículo. Facilitan la transición entre el aire en la parte inferior del

¹ Fenómeno donde la parte trasera del vehículo desliza al entrar en una curva

vehículo con el ambiente, así el aire puede disminuir su velocidad de manera más controlada disminuyendo las diferencias de presión.

- Faldones laterales: Impiden que el aire de alta presión se mezcle con el aire a baja presión que recorre la parte baja del vehículo, manteniendo así la carga aerodinámica.
- Generadores de vórtices: disminuyen la fuerza de arrastre al generar vórtices que redirigen la capa límite hacia la parte trasera del vehículo.
- Cubierta inferior: Los elementos mecánicos en la parte inferior del automóvil generan turbulencias, por lo que instalar una cubierta ayuda a la estabilidad del flujo, acelerándolo en el proceso.
- Alerones delanteros (*Splitters*) y traseros: Son elementos que generan fuerzas verticales que modifican el control del vehículo mediante la circulación del aire por diferentes perfiles para generar una diferencia de presión.



a) Difusor



b) Faldones



c) Generadores de vórtices



a) Cubierta inferior



b) Alerón delantero



c) Alerón trasero

Figura 1.3: Tecnologías de transformación aerodinámica

Respecto a difusores y alerones, estos son una forma pasiva (aunque existen alerones reactivos respecto a la velocidad a la que se circula), simple y de bajo costo para mejorar la aerodinámica de un automóvil al modificar las presiones que lo afectan a través de la carrocería, además de poseer una relativa facilidad de diseño. Con su capacidad de implementación en múltiples vehículos y los efectos sobre la aerodinámica que pueden tener, estos dos apéndices se han establecido como una de las maneras más comunes de mejorar el rendimiento aerodinámico, estando cada vez más presentes en vehículo de serie. Sin embargo, muchas veces los estudios que explican el por qué se toma la decisión de instalar estos dispositivos quedan reservados ya sea para revisiones internas

dentro de los fabricantes o reservados para vehículos de alta gama.

Tomando en cuenta estos puntos, el objetivo de este trabajo es estudiar mediante CFD, el efecto que alerones y difusores en estilos de carrocerías de vehículos disponibles en el mercado chileno teniendo en cuenta las circunstancias de carreteras chilenas para evaluar la posible instalación de estas modificaciones en vehículos.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de título es estudiar mediante CFD el efecto que la instalación de alerones y difusores tienen sobre la aerodinámica de un vehículo en movimiento, ya sea su efecto por separado o en conjunto, haciendo un análisis crítico que permita identificar casos que mejoren la aerodinámica del modelo base de un automóvil corriente.

1.2.1. Objetivos Específicos

- Recopilar los antecedentes acerca de alerones y difusores respecto a su efecto en la aerodinámica de un automóvil, en conjunto a las ecuaciones y parámetros gobernantes de los fenómenos.
- Modelar mediante CAD (*Computer Aided Design*) los diferentes apéndices de acuerdo a los parámetros de diseño investigados.
- Identificar en conjunto a la literatura consultada, las condiciones de borde y la configuración del problema adecuada para su posterior estudio CFD en el software Ansys Fluent.
- Hacer ensayos CFD considerando las diferentes combinaciones de elementos a instalar y las distintas velocidades, para analizar el efecto que estas tienen sobre el comportamiento del flujo.
- Analizar y comparar los resultados para sintetizar una geometría con los elementos que mejoren el rendimiento aerodinámico del vehículo original.

1.3. Alcances

Este trabajo propone el estudio por CFD del diseño e implementación de alerones y difusores, considerando en concreto el diseño de 2 alerones y 2 difusores. Las simulaciones contemplan el uso del software Ansys y se utilizan modelos simplificados de tanto el vehículo y los apéndices, a su punto fundamental que permitan llevar a cabo el estudio aerodinámico, facilitando los tiempos de cálculo requeridos.

Se estudian los efectos bajo un rango de velocidades lo suficientemente altas para que la aerodinámica tenga un efecto importante, pero no son consideradas velocidades difíciles de alcanzar por vehículos comerciales o fuera de los límites establecidos.

Para identificar los casos que tengan un mejor efecto, se utilizan solo los criterios aerodinámicos numéricos y herramientas que visualicen el comportamiento del flujo de aire.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Principios y conceptos

2.1.1. Principio de Bernoulli

La base fundamental de la aerodinámica es el principio de Bernoulli. Este describe las relaciones entre las velocidades de un flujo y las presiones dentro del mismo. Este principio se enuncia:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = cte \quad (2.1)$$

Donde

- p es la presión estática en [Pa].
- ρ es la densidad del fluido en que se desplaza el vehículo, en $[kg/m^3]$.
- v es la velocidad del vehículo en relación al aire en $[m/s]$.

Para cumplir con el valor constante, esta ecuación indica que un cambio de velocidad implica un cambio en la presión del fluido, en concreto, si aumentamos su velocidad, la presión del fluido disminuye y viceversa. En un vehículo, las diferencias de presión son producto de los diferentes caminos que el aire debe recorrer debido a la carrocería, y así se producen las fuerzas durante el movimiento, profundizado en la sección 2.1.3.

Aplicando este concepto a un geometría, el perfil de un alerón por ejemplo, se redirige el aire para generar zonas donde el flujo debe acelerarse y así disminuir su presión respecto al lado opuesto.

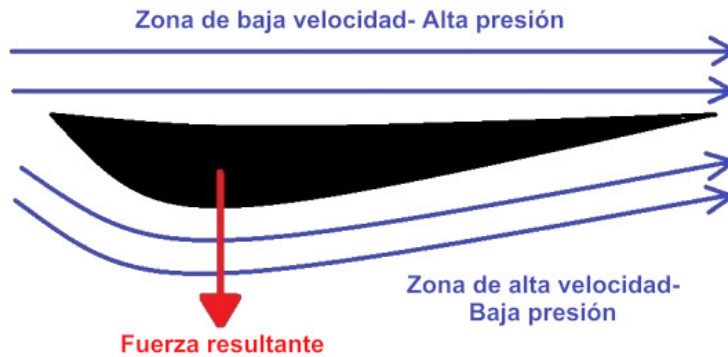


Figura 2.1: Efecto del principio de Bernoulli en alerones

Así, se tiene una diferencia de presión entre la zona superior y la inferior, lo que resulta en una fuerza descendente. En este punto es importante notar que la fuerza generada dependerá del ángulo del alerón, por lo que esta puede descomponerse en la vertical produciendo carga aerodinámica, y en la horizontal produciendo arrastre.

2.1.2. Efecto Venturi

Proveniente de la aplicación del principio de Bernoulli y la conservación de masa en un tubo de Venturi, este efecto se relaciona con aquellas modificaciones que modifican la parte inferior de un vehículo, ya que estas controlan el volumen del aire circulante por esta zona. Este efecto enuncia que un fluido aumenta su presión cuando pasa a una sección de mayor área.

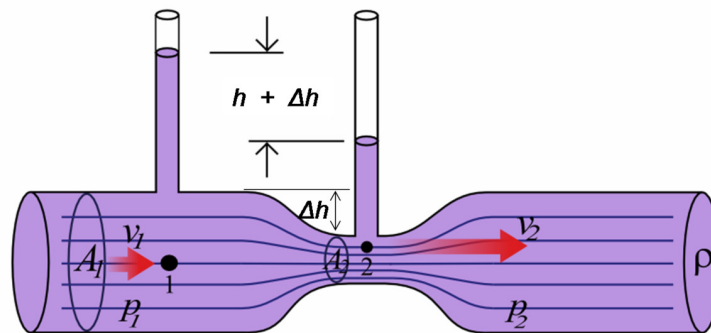


Figura 2.2: Tubo de Venturi, donde la presión ha sido representada por la diferencia de la altura de la columna de agua

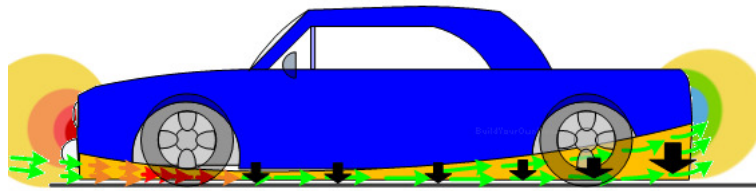


Figura 2.3: Aceleración del flujo en la parte inferior del vehículo [22]

Si asimilamos un automóvil a un tubo de Venturi, la diferencia entre el volumen del aire que se encuentra entrando a la parte inferior del vehículo y el aire que se encuentra recorriendo el difusor en la parte trasera, equivale a la segunda mitad del tubo de Venturi. Así, se explica la menor presión bajo el vehículo, resultante en una mayor fuerza de carga.

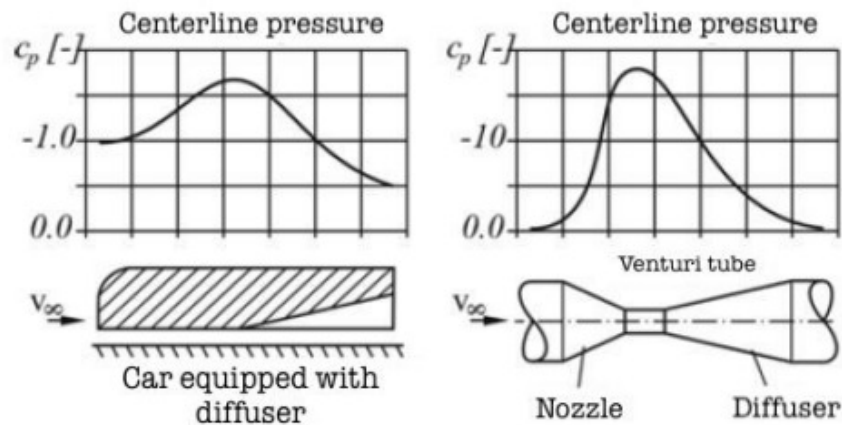


Figura 2.4: Evolución de la presión bajo la parte inferior de un vehículo con difusor y en un tubo de Venturi [17]

Además, como fue mencionado anteriormente, esta expansión en la parte trasera permite que el aire a alta velocidad bajo el vehículo se reintegre de manera más ordenada al encontrarse con el aire a menor velocidad y disminuyendo así las turbulencias generadas en la estela.

2.1.3. Fuerzas aerodinámicas

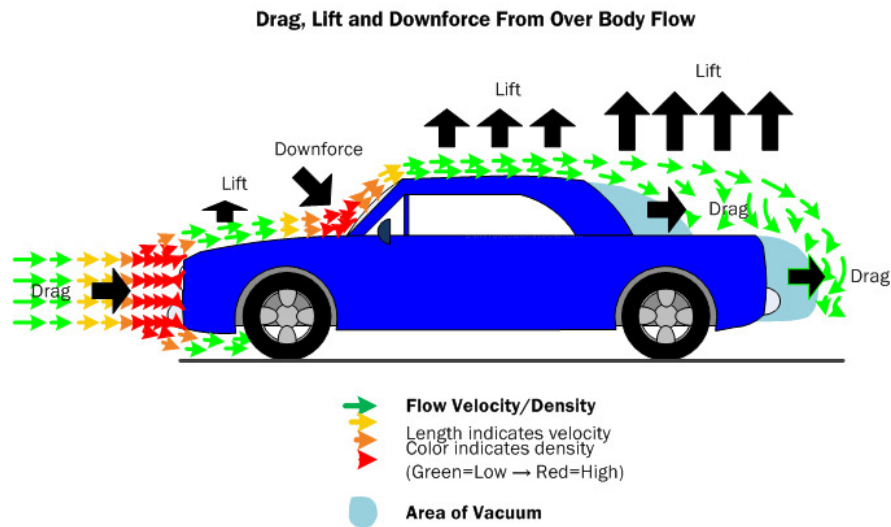


Figura 2.5: Fuerzas aerodinámicas presentes durante el movimiento de un automóvil [22]

- **Sustentación:** O *lift* en literatura inglesa, es aquella componente de la fuerza ejercida por el aire en el eje vertical, resultante de la diferencia de presión entre el aire que recorre la carrocería del vehículo y aquel que pasa por debajo del mismo, generando una fuerza ascendente sobre el vehículo. Incrementa su magnitud a medida que se incrementa la velocidad, y en vehículos de altas prestaciones puede ser negativa, sin embargo, es de vital importancia monitorear esta fuerza en todos los casos, ya que la incorrecta gestión de esta fuerza puede resultar en un efecto catastrófico².

Esta fuerza se expresa con la siguiente fórmula:

$$F_{sust} = \frac{1}{2} \rho v^2 A_s C_L \quad (2.2)$$

- ρ es la densidad del fluido en que se desplaza el vehículo, en $[kg/m^3]$.
- v es la velocidad del vehículo en relación al aire en $[m/s]$.
- A_s corresponde a la sección transversal del automóvil $[m^2]$.
- C_L es el coeficiente de sustentación.

A veces, se considera la fuerza de carga aerodinámica dentro de la fuerza de sustentación como resultado final, sin embargo, se optó por definirla de manera separada con propósitos explicativos.

- **Arrastre:** Con otros nombres como *Drag* o Resistencia, es la componente de la fuerza ejercida por el aire que se opone al movimiento horizontal del vehículo. Es generada por la baja de

² El vuelo de Mercedes en LeMans: <https://youtu.be/e21ZjwZGjiQ>

presión en la parte posterior del vehículo en el sentido de marcha. Esta fuerza es el principal foco de estudio de la aerodinámica en vehículos tradicionales.

$$F_{arr} = \frac{1}{2} \rho v^2 A_s C_d \quad (2.3)$$

- ρ es la densidad del fluido en que se desplaza el vehículo, en $[kg/m^3]$.
 - v es la velocidad del vehículo en relación al aire en $[m/s]$.
 - A_s corresponde a las sección transversal del automóvil $[m^2]$.
 - C_d es el coeficiente de arrastre.
- Carga: Aunque universalmente conocida como *Downforce*, son el resultado de las fuerzas en el eje vertical que empujan la carrocería hacia el piso. Es diferenciada aparte de la fuerza de sustentación ya que se considera el efecto generado por elementos aparte de la carrocería del vehículo. Una de las formas más eficientes de generar Carga es mediante el uso de alerones.
 - Empuje: También llamada *Thrust*, es la fuerza en el sentido de movimiento que ejerce el tren de marcha del vehículo.

2.1.4. Coeficientes Aerodinámicos

Los coeficientes mencionados anteriormente se han determinado para facilitar el estudio de la aerodinámica. A continuación se da una pequeña descripción de cada uno de estos índices.

- Coeficiente de arrastre (C_x o C_d): Este valor adimensional cuantifica la resistencia de un objeto en el fluido en movimiento, depende de tanto el fluido y su velocidad como la geometría del objeto en cuestión. En la práctica, este coeficiente determina las prestaciones como la velocidad máxima y el consumo de combustible al determinar la fuerza contraria al avance.
- Coeficiente de sustentación (C_L): Similar al caso anterior, pero representa la resistencia en el eje vertical. Puede tener tanto valores negativos como positivos.
- Sección transversal (A_s): Representa el área máxima de la proyección del vehículo. Tiene diferentes formas de calcularse mediante estimaciones, pero el uso de software CAD ha facilitado su cálculo.

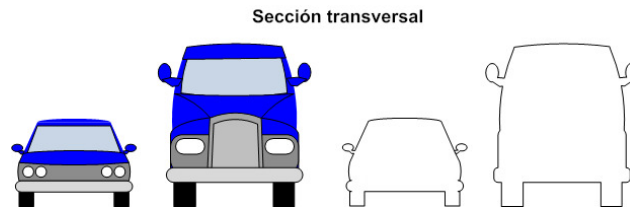


Figura 2.6: Representación del área transversal [22]

En los estudios de la aerodinámica, generalmente se entregan los valores de estos coeficientes o de las fuerzas resultantes, ya que al ser solo un ponderador, el aumento de una implica el aumento de la otra y viceversa para el caso en que disminuya.

2.2. Alerones

Los alerones son un elemento simple y eficiente de mejorar el rendimiento aerodinámico de un vehículo de serie. Existe una extensa variedad de alerones traseros, inicialmente estos se pueden dividir en 2 grandes clases de acuerdo a su efecto final:

1. Aumentar la carga aerodinámica: Generar una fuerza en el eje vertical que empuje el auto hacia abajo, contrarrestando las fuerzas que puedan levantar el automóvil. Mejoran el contacto entre los neumáticos y la superficie lo que a su vez mejora el agarre y control del vehículo. Los responsables de estos son los alerones altos que tienen unos centímetros de altura [14].
2. Disminuir la fuerza de arrastre: Al alterar la geometría, disminuye la resistencia y las turbulencias al mejorar el área de transición turbulenta en la parte posterior del vehículo, a su vez se tiene un incremento menor de fuerzas de carga. Bajo esta categoría están los alerones bajos que son una extensión del cuerpo del vehículo [14].



(a) Modelo de Alerón bajo



(b) Perfil del alerón Bajo

Figura 2.7: Modelo de alerón bajo *Spoiler*

Adicionalmente existe una gran cantidad de parámetros que determinan la forma y eficacia de un alerón trasero: su extensión, su punto de anclaje, inclinación, etcétera. Los parámetros más importantes son mencionados en la sección 2.1.1, una vez se han descrito los conceptos relevantes.

2.2.1. Parámetros de diseño de alerones

Existen diferentes tipos de alerones según su forma, pero a grandes rasgos los parámetros a configurar en un alerón para obtener las diferencias de presiones buscadas consisten en:

- Ángulo y borde de ataque: Es el ángulo entre el sentido de marcha y el ala del alerón, y la ubicación de la curvatura máxima respectivamente. Contribuyen a la separación del flujo laminar y sus efectos. Estudios anteriores, [8], [11] y [6], han demostrado que estas 2 variables afectan directamente el coeficiente de sustentación y de arrastre generado por un mismo perfil de un alerón, incrementando así la fuerzas de arrastre y de carga aerodinámica, aunque también se ha encontrado la existencia de un máximo de fuerza de carga generada respecto al coeficiente de sustentación en ángulos de mayor valor [7].

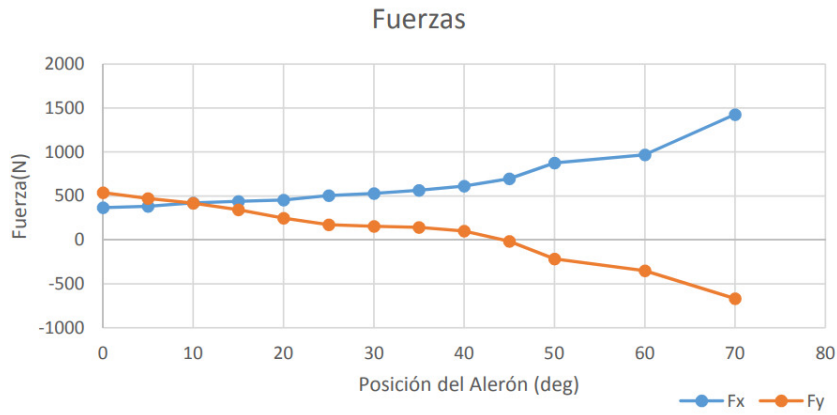
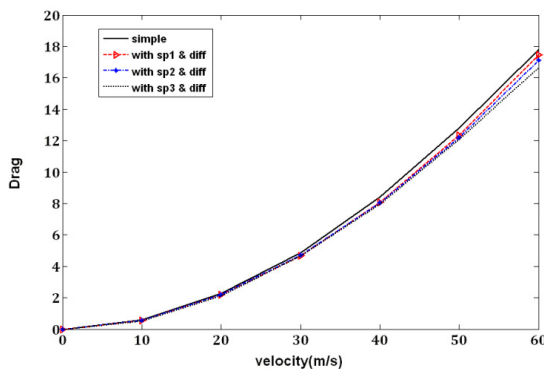


Figura 2.8: Evolución de Fuerza de arrastre (F_x) y Fuerza de sustentación (F_y) de un mismo alerón para diferentes ángulos de ataque [6]

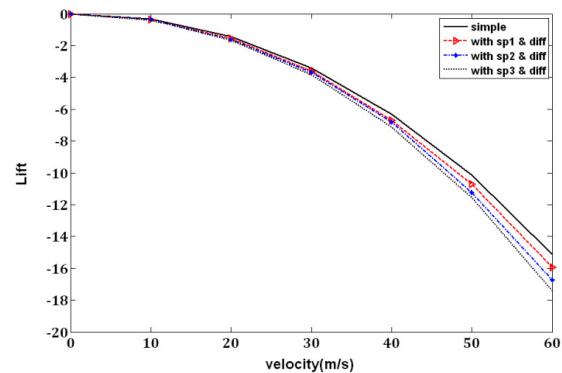
- **Envergadura:** Es el ancho del alerón, estudios indican ([6]) que un alerón más largo, con una mayor relación entre su largo y su ancho, presentan un mayor coeficiente de sustentación, generando una mayor fuerza vertical.
- **Altura:** Corresponde a la distancia entre la carrocería y el alerón. Estudios (M. Jahanmiri [3]), han demostrado que la altura de un alerón, considerando su punto de anclaje hasta el ala, es proporcional a la carga generada a la vez que reduce la fuerza de arrastre a medida que se aumenta la velocidad.

Tabla 2.1: Configuración usada para el estudio de la altura de alerones [3]

Configuración	Descripción	Nomenclatura
1	Modelo original	simple
2	Modelo con alerón de 1 cm de altura	sp1
3	Modelo con alerón de 2 cm de altura	sp2
4	Modelo con alerón de 3 cm de altura	sp3



(a) Altura y fuerza de arrastre [3]



(b) Altura y fuerza de sustentación [3]

Figura 2.9: Relación de altura y fuerza generadas en alerones

- **Cantidad de elementos y aletas laterales:** En competición existen alerones de múltiples etapas donde cada una varía el ángulo, lo que permite generar una mayor fuerza vertical en un menor

espacio. Por otro lado, aletas laterales permiten ordenar el fluido a través de la extensión completa del alerón.

Aún así, es importante notar que el uso de un alerón modifica negativamente el coeficiente de arrastre en el caso de alerones en altura, sin embargo, se considera que los beneficios sobre la carga aerodinámica y por ende el control del vehículo contrarrestan esta desventaja.

2.3. Difusores

Como se mencionó en secciones anteriores, los difusores corresponden a elementos ubicados en la parte inferior trasera de un vehículo que se encargan de modificar el flujo del aire al crear una zona con diferencias de presión en aquel aire atrapado bajo el vehículo.

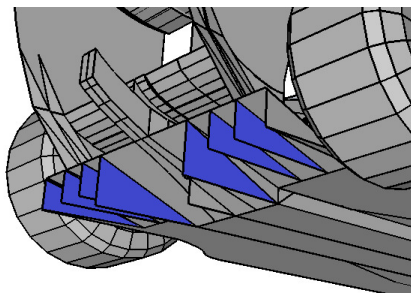
Su mayor exponente se puede apreciar en los vehículos de Fórmula 1, donde contrario a lo que podría pensarse, no se basan en tener un bajo coeficiente de arrastre para mejorar su rendimiento aerodinámico, sino en generar masivas fuerzas verticales para adherir estas máquinas al piso y poder tener mayor control a altas velocidades, con el uso de múltiples difusores en la carrocería siendo una de las principales formas de lograr este objetivo.

Sin embargo, los difusores utilizados en competición no son factibles a utilizar en un vehículo de circulación normal, por lo que los difusores diseñados con este propósito en mente suelen tener dimensiones reducidas para su instalación considerando las partes adicionales.

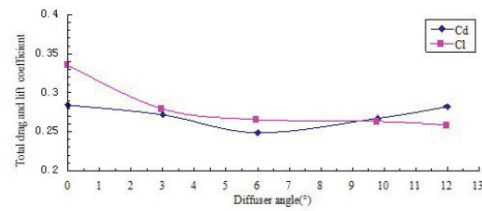
2.3.1. Parámetros de diseño de difusores

En contraste a alerones, los difusores no presentan muchos parámetros de diseño, esto debido a que su posición e instalación esta sujeto al diseño ya existente del vehículo, limitando el ancho y el largo en la dirección transversal. Así, a la hora de diseñar se tienen parámetros como el ángulo de inclinación y las divisiones interiores.

- **Ángulo de inclinación:** Directamente relacionado con el área de transición generada y por ende la cantidad de carga y arrastre generado. Estudios de caso ([18] y [19]) observaron que un mayor ángulo genera una disminución del coeficiente de sustentación, en cuanto al coeficiente de arrastre, este disminuye hasta un punto donde es mínimo alrededor de 6° para luego volver a aumentar su valor.
- **Divisiones interiores:** Determinados por aletas interiores, su efecto es dividir el fluido, disminuyendo turbulencias y facilitando su desaceleración [18].



(a) Divisiones de un difusor



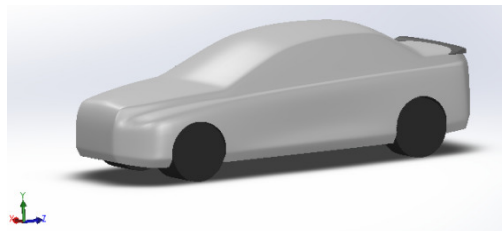
(b) Coeficientes aerodinámicos de un difusor a distintos ángulos [18]

Figura 2.10: Divisiones interiores de un difusor y su efecto

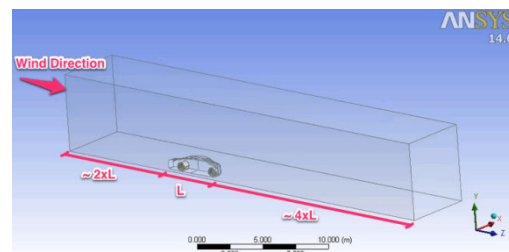
2.4. Aplicación de CFD en la aerodinámica

El objetivo del estudio por CFD corresponde a simular un túnel de viento, definiendo la velocidad de entrada del aire para emular el movimiento del vehículo. Los requerimientos para ello, generalmente definidos en la literatura [12] corresponden a:

- Definir un dominio lo suficientemente grande que albergue al vehículo y permita el desarrollo del fluido en la parte posterior del vehículo.
- El modelo CAD de un vehículo reducido a un punto básico que permita el estudio con baja carga computacional.
- Correcta definición de las condiciones de borde del problema, teniendo en cuenta esfuerzos generados sobre el aire y su relación con paredes fijas.



(a) Modelo de automóvil simplificado [12]



(b) Configuración general de la simulación [12]

Figura 2.11: Modelos en estudios CFD

Las condiciones de bordes estándar a la hora de hacer estudios de aerodinámica, las cuales principalmente definen las condiciones de pared, velocidades de entrada y salida del fluido, además de definiciones del vehículo son expuestas a continuación.

Tabla 2.2: Descripción de condiciones de borde

Condición de Borde	Descripción	Valor
Entrada	Describe la velocidad con que entre el aire al poliedro	TBD [km/h]
Entrada	Describe la presión con que entre el aire al poliedro	1 [atm]
Salida	Describe la presión con que sale el aire del domo	Libre
Pared superior	Pared deslizante	-
Pared inferior	Pared estática/móvil	-
Automóvil	Pared estática	-
Pared lateral exterior	Pared deslizante	-
Pared lateral interior	Condición de simetría	-

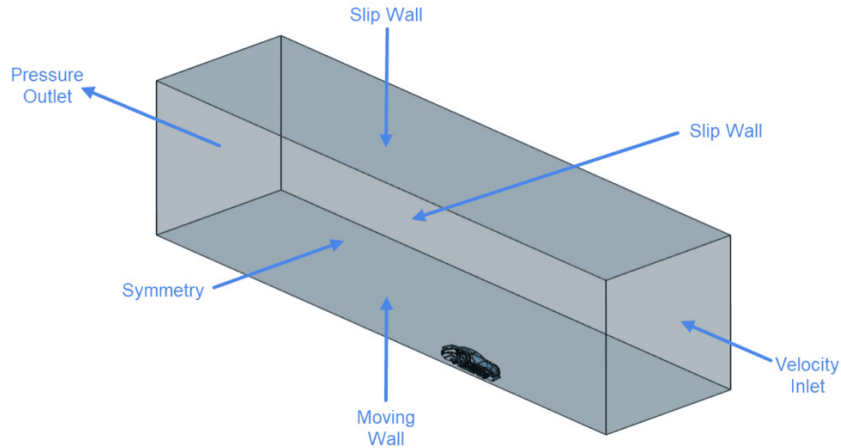


Figura 2.12: Esquema de condiciones de borde [23]

Luego se procede a hacer uso de algún software con CFD implementado, siendo Ansys con sus ramas Fluent o CFX el software más popular. Estos softwares permiten producir un registro detallado del comportamiento del aire y como reacciona frente a la geometría del vehículo utilizado, donde los resultados más importantes corresponden a la fuerzas de arrastre y carga generada pero considerando análisis de las líneas de presión y velocidad del aire.

2.5. Modelos y ecuaciones

Las ecuaciones y matemáticas utilizadas para que un software CFD produzca resultados es complicada y bastante extensa, pero a continuación se denotan algunas de las necesarias para comprender ciertos temas tratados en este trabajo.

2.5.1. Conservación de Masa

La conservación de masa de un fluido en un elemento cerrado, tomando en cuenta que a velocidades de circulación normales se puede considerar el aire como un fluido incompresible, es:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.4)$$

2.5.2. Ecuaciones de Navier Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de un fluido viscoso. Para el caso en tres dimensiones estas consisten en:

$$x) \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

$$y) \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

$$z) \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.7)$$

2.5.3. Modelo para turbulencias

El modelo seleccionado para modelar las turbulencias por CFD es el modelo $k - \varepsilon$, el cual calcula las energías generadas por las turbulencias y su disipación mediante ecuaciones parciales. Para este modelado se define la viscosidad turbulenta.

$$\nu_t = \frac{C_\mu \cdot k^2}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

Luego de unas simplificaciones, el modelo usado resulta en respectivamente, una ecuación para la energía cinética turbulenta k y otra para la disipación ε :

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G - \varepsilon \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.10)$$

Donde empíricamente se han obtenido los siguientes valores:

- $C_\mu = 0,09$
- $\sigma_k = 1$
- $\sigma_\varepsilon = 1,3$
- $C_{\varepsilon 1} = 1,44$
- $C_{\varepsilon 2} = 1,92$

2.5.4. Ley de Pared

La ley de pared establece la relación entre la velocidad de un fluido turbulento y la pared límite, en la cual el fluido tiene una velocidad nula y se debe tratar de manera diferente para una correcta obtención de resultados.

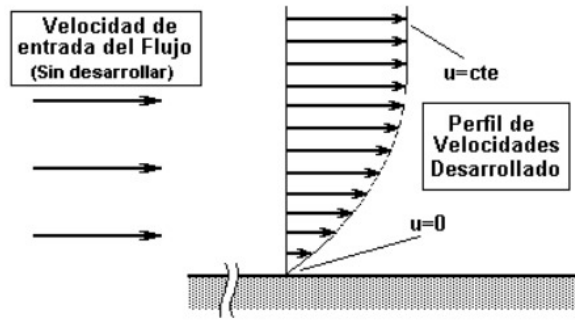
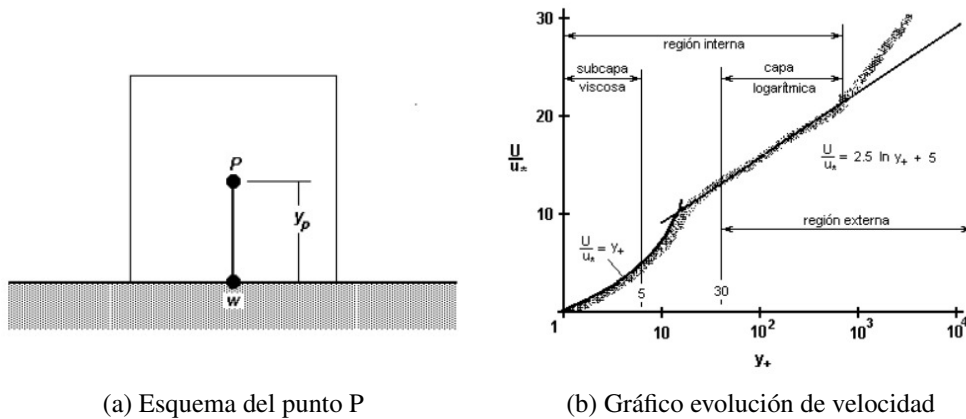


Figura 2.13: Perfil de velocidades

Donde la ecuación que determina la velocidad en un punto en función de la distancia con la pared corresponde a la imagen (a) de la figura 2.14 , donde se aproximan las velocidades de los puntos fuera de la zona de la turbulencia según la capa logarítmica que indica la imagen (b) de la figura 2.14 .



(a) Esquema del punto P

(b) Gráfico evolución de velocidad

Figura 2.14: Altura del punto a estudiar y el efecto de esta altura sobre la ecuación a utilizar

Inicialmente se tienen las siguientes ecuaciones:

$$y^+ = \frac{y_p u_t}{\nu} \quad (2.11)$$

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.12)$$

$$u^+ = y^+ \quad (2.13)$$

$$u^+ = \frac{1}{k_c} \ln(y^+) + C \quad (2.14)$$

- y^+ es la distancia respecto a la pared, adimensionalizada.
- u^+ es la velocidad adimensional.
- u^t es la velocidad de fricción o corte.
- τ_w corresponde al esfuerzo cortante en la pared.

- C y k_c son constantes empíricas.

Y al aplicar las condiciones de borde de la pared se tiene:

$$u_t = C_\mu^{1/4} k^{1/2} \quad (2.15)$$

$$\left. \frac{\partial k}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (2.16)$$

Finalmente se calcula la tasa de disipación con la ecuación:

$$\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{k y_p} \quad (2.17)$$

2.6. Fenómenos aerodinámicos

Mientras la existencia de herramientas visuales se ha utilizado durante décadas, como el uso de humo blanco para trazar las líneas de flujo, es la aplicación de herramientas computacionales las cuales han permitido estudiar con mejor claridad visual como el cuerpo del automóvil afecta y deforma el aire circulante.

Los fenómenos son creados principalmente en la zona de estela (también referida como zona de aguas abajo, aguas muertas, zona de estancamiento o *Wake Region*). A continuación, se cubre los términos más importantes relacionados con estos fenómenos.

- Zona de estela (*Wake Region*): Consiste la zona de baja velocidad generada luego de la interacción con un cuerpo, en el caso de un automóvil correspondiente a la parte trasera en la cual el aire de baja velocidad debe igualar la velocidad circulante, resultando en una zona con alta presencia de turbulencias.

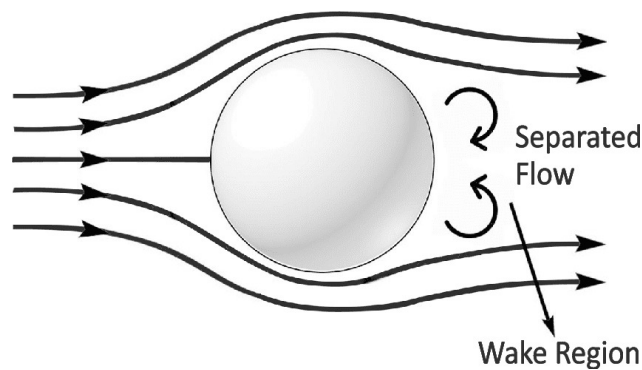


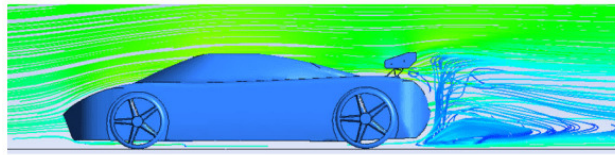
Figura 2.15: Esquema de región de estela [14]

- Separación de flujo: Determina cuando el flujo se separa de la superficie del vehículo, el cual se adhiere gracias a las curvas en la parte frontal al entrar en roce con la carrocería. Dependiendo de donde pasa esta separación respecto a la lejanía del vehículo, se determina que tan grande es la zona de estela.
- Turbulencias y recirculación del flujo: Originadas por las separación del flujo, son las zonas del flujo en las cuales sus cambios de velocidad, la alta convección y momentos hacen que el flujo se desordene y altere su camino, creando remolinos al recircularse sobre su trayectoria. Aparte de alterar las fuerzas aerodinámicas, puede que las geometrías de un vehículo interactúen con las turbulencias de manera de generar vibraciones y ruidos no deseados.
- Capa límite: En el caso de un vehículo representa una zona en la proximidad a la carrocería donde la viscosidad es dominante. Es de gran importancia ya que dentro de esta zona se utilizan ecuaciones diferentes para calcular las fuerzas generadas debido al contacto con el vehículo.

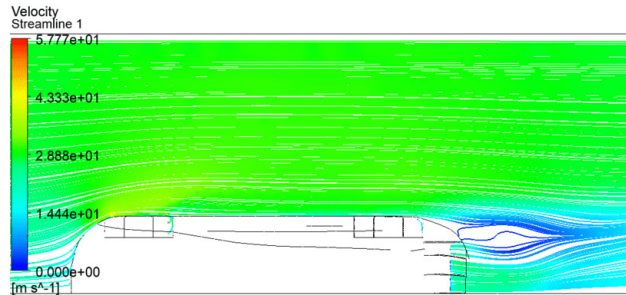
De manera general, se busca disminuir la zona de estela para reducir la diferencia de presión respecto a la zona delantera del vehículo y así disminuir las fuerzas de arrastre.

Por su lado, los softwares CFD disponen de las siguientes herramientas para detectar los diferentes fenómenos de manera clara y concisa para su análisis visual:

- Líneas de flujos (*Streamlines*): Las líneas de flujo, ya sean en 2 o 3 dimensiones, permiten seguir el flujo de las partículas de aire a través del dominio y ver como su trayectoria se reordena frente al cuerpo que contacta.



(a) Líneas de flujos en un plano vertical



(b) Líneas de flujo en un plano horizontal

Figura 2.16: Ejemplos de líneas de flujo

- Contorno de energía cinética turbulenta (k): Permite observar la intensidad energética de las turbulencias, k , al cuantificar las variaciones del movimiento de los remolinos (*Eddies*) en los 3 ejes, donde un mayor valor indica turbulencias más desordenadas.

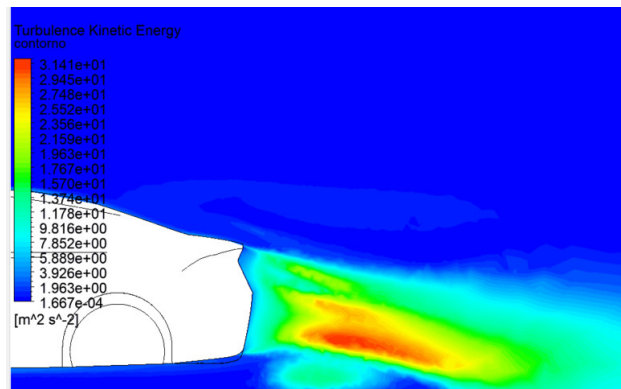


Figura 2.17: Contorno de energía cinética turbulenta en la estela de un vehículo

- Vorticidad: Mediante la cuantificación de la energía rotacional del flujo, permite representar gráficamente los puntos del flujo en los cuales se genera vorticidad según cierto umbral.

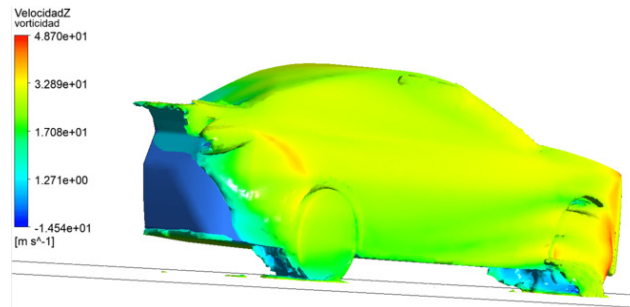


Figura 2.18: Vorticidad de turbulencias en un vehículo

- Q-criterion: Un complemento de la vorticidad que normaliza este valor al operarlo con el gradiente de velocidad en la zona. Permite observar la posición, la forma y el efecto extendido de las vorticidades presentes.

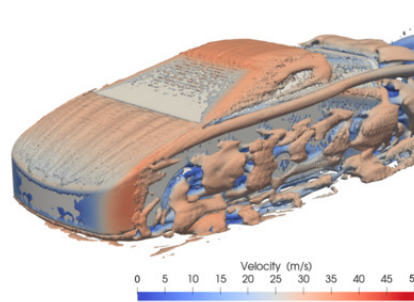


Figura 2.19: Iso-Contorno de Q-Criterion en un vehículo [15]

2.7. Números adimensionales

Los números adimensionales tienen una gran importancia en los estudios CFD ya que permiten describir de manera rápida el comportamiento del fluido que se está estudiando para diferentes condiciones y configuraciones. Los números más importantes en el caso de la aerodinámica son el número de Reynolds y el número de Mach.

2.7.1. Número de Reynolds

Este número indica la relación entre las fuerzas viscosas e inercia dentro de un fluido, en otras palabras, indica si el fluido estudiado se comporta laminar o turbulentamente. En el caso de un vehículo circulando sobre una superficie plana, este se calcula de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L_{auto}}{\mu} \quad (2.18)$$

- ρ es la densidad del fluido en que se desplaza el vehículo, en $[kg/m^3]$.
- v es la velocidad del vehículo en relación al aire en $[m/s]$.
- L_{auto} corresponde al largo horizontal del automóvil $[m]$.
- μ es la viscosidad dinámica del aire $[Pa \cdot s]$.

Generalmente se considera que se encuentra bajo un régimen turbulento cuando este número supera el valor de $5 \cdot 10^5$.

2.7.2. Número Mach

El número de Mach es la relación entre la velocidad de un artefacto en comparación de la velocidad del sonido en el mismo medio, este es determinado por la siguiente ecuación:

$$M = \frac{u}{u_s} \quad (2.19)$$

- M es el número de Mach.
- u es la velocidad del vehículo.
- u_s corresponde a la velocidad del sonido, $334 [m/s]$ para las condiciones establecidas.

Donde se considera que el límite para considerar el aire como incomprensible se encuentra en el valor 0,3.

2.8. Límites de velocidades en Chile

Como se trató en la sección 2.1.3, las fuerzas presentes en un vehículo dependerán de las velocidades a las que se circulan, por lo que es importante considerar las velocidades que efectivamente se pueden alcanzar en Chile.

Las normativas de velocidad en Chile [24], establecen los siguientes límites de velocidad dependiendo de las zonas:

- **Zonas Urbanas:** La velocidad máxima permitida es de $50 [km/h]$ para vehículos livianos como automóviles y motocicletas.
- **Zonas No Urbanas:** Las velocidades dependerán de la calzada:
 - Si la calzada tiene solo una pista por sentido, la velocidad máxima permitida es de $100 [km/h]$.
 - Cuando hay más de 2 pistas en un mismo sentido este límite aumenta a $120 [km/h]$.
- **Carreteras:** Pese a existir límites, la autoridad puede modificarlos en determinadas vías instalando las señales correspondientes.

Así, considerando estos límites y que las fuerzas aerodinámicas son de menor importancia a bajas velocidades, se establecen las siguientes velocidades que cubren el espectro de velocidades permitidas en Chile: $60, 80, 100$ y $120 [km/h]$.

Capítulo 3

Metodología

El desarrollo de este trabajo se basa principalmente en el estudio por CFD de la aerodinámica de un vehículo, por lo que la metodología consiste en la búsqueda de antecedentes, la generación de las geometrías necesarias y la aplicación en software para luego hacer el estudio del comportamiento del fluido. A continuación se describe la metodología propuesta en forma de etapas.

1. **Recopilación de antecedentes y bibliografía:** La tarea inicial corresponde a la búsqueda de la información existente sobre los temas del trabajo. Mediante esta recopilación se identifican los parámetros de diseño de alerones y difusores, además de la matemática involucrada. Adicionalmente, estudios de caso anteriores permiten tener una mejor conceptualización de la configuración de problemas aerodinámicos en Ansys.
2. **Diseño del vehículo, alerones y difusores mediante CAD:** Consiste en el diseño del vehículo, alerones y difusores en Autodesk Inventor, documentando los parámetros de diseño. Los componentes son generados como piezas o ensamblajes que luego son exportados para su uso en Ansys.
3. **Preparación de dominios en Ansys SpaceClaim:** Teniendo en cuenta los antecedentes investigados como fue mencionado en la sección, el estudio de aerodinámica por CFD se basa en la simulación de un túnel de viento, por lo que se debe crear un dominio en la herramienta *SpaceClaim*. El dominio debe configurarse de manera que permita el correcto desarrollo del fluido luego del contacto en el vehículo, además, se deben identificar las zonas donde se aplicarán las condiciones de borde.
4. **Estudio de independencia de la malla:** Se estudia la dependencia y calidad de la malla generada con las geometrías, donde se debe configurar y modificar el mallado generado por Ansys de manera de tratar correctamente las zonas problemáticas.
5. **Estudio y análisis de la aerodinámica por CFD del vehículo base:** Una vez se tiene un mallado adecuado, se procede a configurar el problema en el apartado *Setup* de Ansys para así generar los resultados, considerando el vehículo base sin ninguna modificación. A continuación se efectúa la simulación correspondiente y se analiza gráficamente la interacción carrocería-aire.
6. **Estudio y análisis de la aerodinámica por CFD del vehículo con apéndices instalados:** Análogo al caso anterior, este apartado considera el estudio CFD del vehículo pero con diferentes combinaciones de apéndices instalados, cubriendo los casos especificados.

7. **Análisis de resultados y propuesta de mejora:** Una vez se tienen los resultados gracias a los estudios CFD, se procede a comparar las fuerzas presentes y la evolución de los coeficientes de sustentación y arrastre según la velocidad. Finalmente se propone una configuración que mejore el rendimiento aerodinámico del vehículo utilizando criterios adecuados.

3.1. Recursos

Como ya fue mencionado anteriormente, se necesita de los elementos en conjunto de modelado de geometrías y de CFD, por lo que las herramientas y recursos necesarios son fundamentalmente softwares.

- Software de modelado CAD: Todos los modelos son desarrollados en el software Autodesk Inventor.
- Software CFD: La base del trabajo es la modelación de un fluido mediante un entorno de Fluent en el software Ansys 2020 R1.
- Excel y Python: Estas herramientas proporcionan un entorno para análisis y exposición numérica.

Capítulo 4

Desarrollo

4.1. Modelos CAD

Para diseñar el modelo, se consideró un vehículo sedán del segmento B, los cuales se pueden caracterizar por tener un largo de alrededor de 4,5 [m] considerando un espacio de 5 pasajeros. El modelo se basa principalmente en el automóvil *Hyundai Elantra* de séptima generación (2021), pero considerando elementos de diseños de vehículos similares como el *Toyota Camry* de octava generación y el *Honda Civic de onceava generación*. Esto fue considerado dado a que al usar un modelo con una geometría simplificada, muchos de los elementos que diferencian a un vehículo de otro son eliminados o disminuidos.

Para generar el modelo se hizo uso de AutoCAD Inventor 2024, utilizando la importación de los planos del vehículo como imágenes y generando la geometría utilizando las diferentes herramientas como *Extrude*, *Loaf* e *Intersect*.

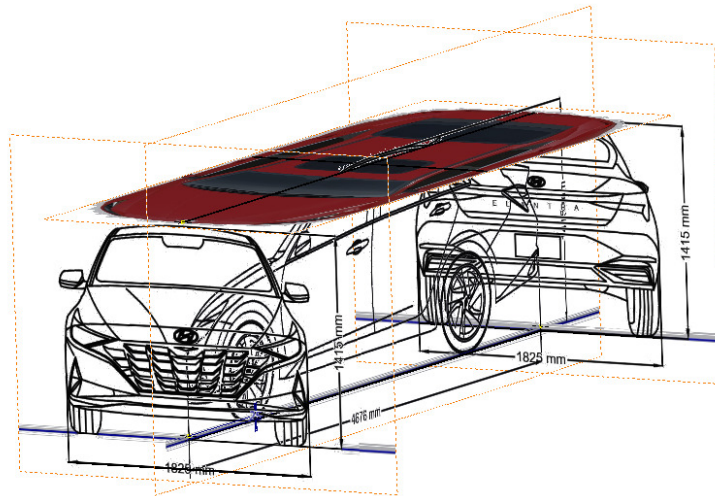


Figura 4.1: Posición de las vistas iniciales

1. Se dibujan diferentes perfiles a lo largo del eje longitudinal del vehículo y se utiliza la herramienta *Loft* para generar una geometría a lo largo.

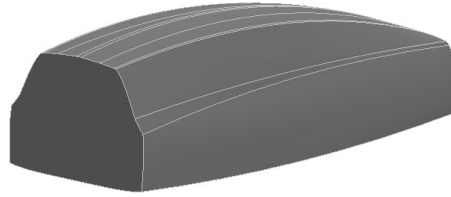
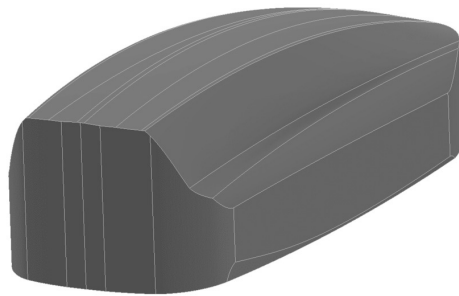
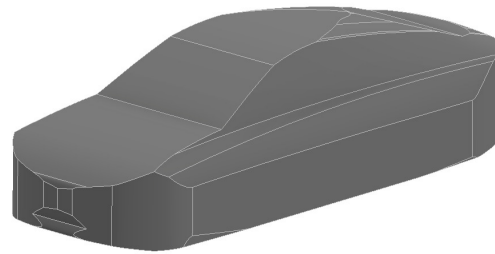


Figura 4.2: Cuerpo resultante de aplicar loft

2. Utilizando el perfil de la vista superior y luego el perfil lateral, se genera una Extrusión a en ambas direcciones donde solo se conserva la intersección entre ambos perfiles y el cuerpo resultante del paso anterior.



(a) Intersección con vista superior



(b) Intersección con perfil lateral

Figura 4.3: Cuerpo resultante de la intersección de las extrusiones

3. Luego se retocan los detalles finales, agregando las ruedas y simplificando diferentes geometrías que pueden generar errores durante el mallado de Ansys.

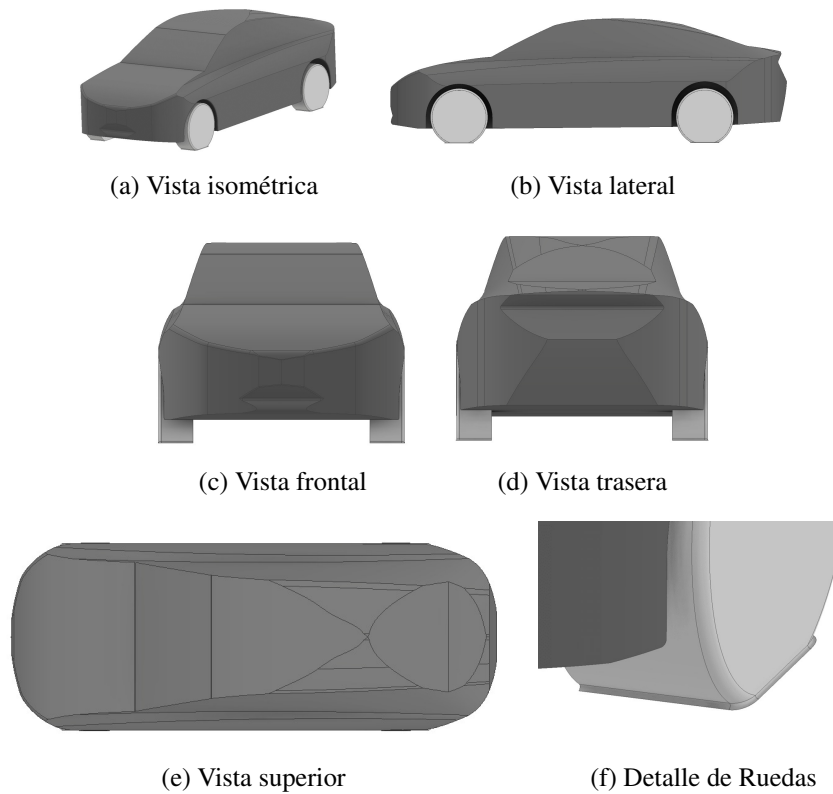


Figura 4.4: Cuerpo resultante de la intersección de las extrusiones

Este modelo es luego utilizado como un ensamblaje y se exporta como una pieza simple mediante la herramienta *Simplify* para su utilización en *SpaceClaim* de Ansys.

4.1.1. Modelado de Alerones

Los alerones a utilizar corresponden a ambos tipos descritos en los antecedentes. Para el caso del alerón alto (también denominado alar o *Wing* para su comprensión y futura referencia) se hace un modelo a partir de un perfil alar NACA 23012, un perfil utilizado para el diseño de alerones personalizados y del cual se conoce su efectividad. Este perfil es importado en forma de coordenadas, invertido e inclinado para luego extruirlo al ancho del vehículo (1,8 [m]) y añadir elementos hasta completar el alerón.

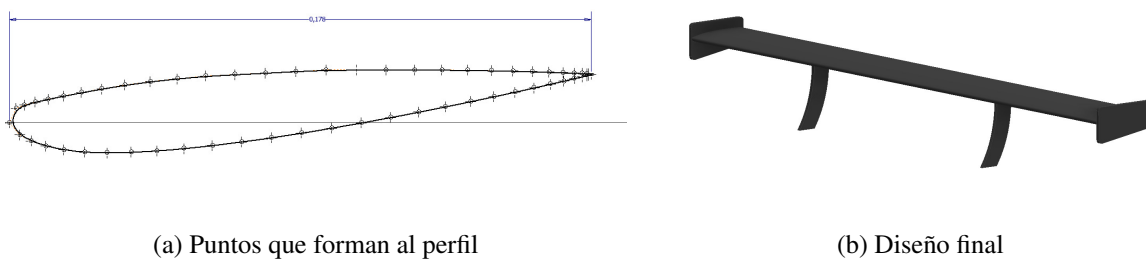


Figura 4.5: Modelo de alerón alto *Wing*

Para el modelo del alerón bajo (el cual se denominará *Spoiler*) se hace un pieza simple la cual no sigue algún diseño particular y actúa como extensión del cuerpo del vehículo para impedir que

el aire se reincorpore violentamente al ambiente. Esta decisión se basa en los modelos expuestos en diferentes publicaciones; [12], [14], [13], donde se han utilizado formas arbitrarias basadas en alerones ya existentes.

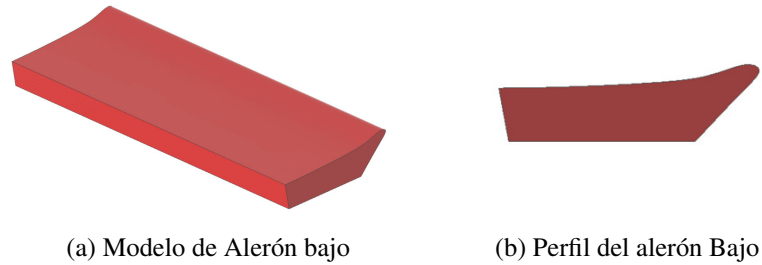


Figura 4.6: Modelo de alerón *Spoiler*

4.1.2. Modelado de Difusores

Los dos modelos de difusores a estudiar se exponen a continuación:

1. Un difusor genérico cuyo rendimiento haya sido probado, basándose en el diseño propuesto por P. B. Senthilkuma ([19]), el cual consiste en un área de expansión simple a 6° con aletas rectas de 10 mm de espesor separadas a 240 mm.

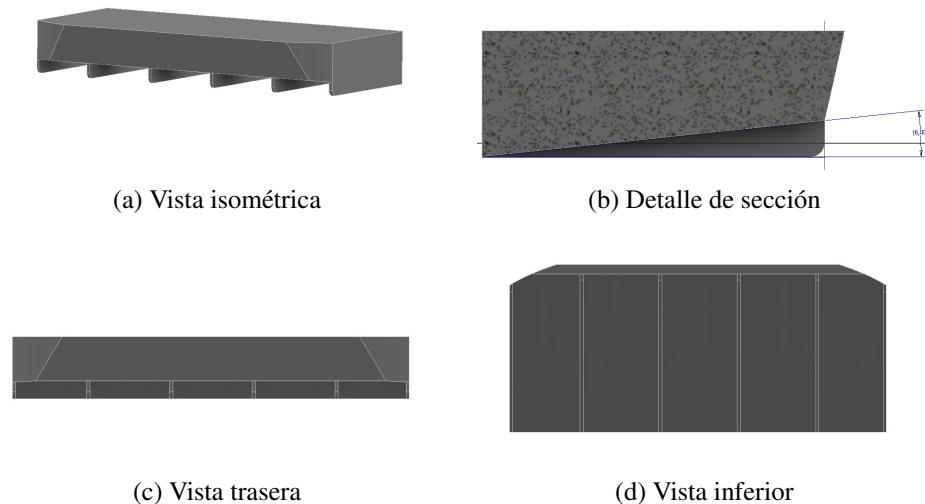
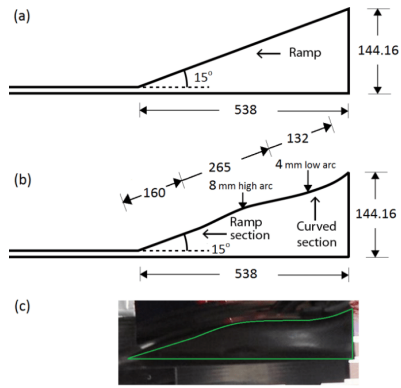


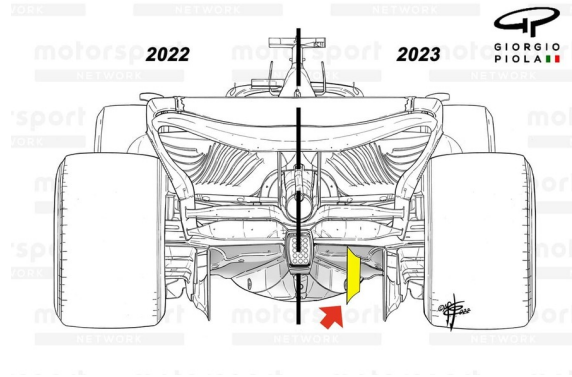
Figura 4.7: Modelo del Difusor Recto

Este tipo de difusores con separaciones rectas es el diseño más común ya sea incluido en el modelo base del vehículo o como modificación posterior.

2. Un segundo difusor con un diseño basado en difusores utilizados en competición, tomando elementos del difusor modificado expuesto por B. Senthilkuma ([19]) y regulaciones sobre difusores establecidas para los vehículos utilizados en la Fórmula 1, adicionalmente explorados por Ehirim en su estudio ([17]).



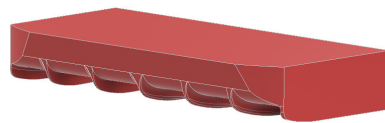
(a) Curva de expansión estudiada por Ehirim [17]



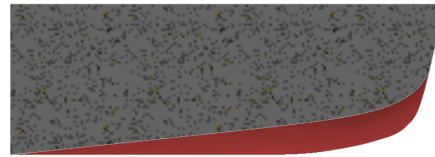
(b) Elementos de difusores en F1

Figura 4.8: Elementos de diseño de Difusor Curvo

Así, resulta un difusor con un diseño más elaborado, el cual parte con una recta inclinada a 6° pero se expande en el extremo posterior, adicionalmente, las aletas separadas a 220 mm siguen una curva para facilitar el recorrido del aire.



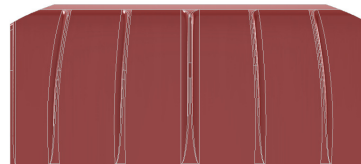
(a) Vista isométrica



(b) Detalle de sección



(c) Vista trasera



(d) Vista inferior

Figura 4.9: Modelo del Difusor Curvo

Mientras un modelo real debiera tener otro tipo de ensamblaje, se optó por hacer modelos con forma de paralelepípedo para facilitar las permutaciones con los alerones y el modelo base.

4.1.3. Modelos utilizados

Los modelos completos para utilizar en los estudios CFD se hacen iterando los modelos en los ensamblajes y exportándolos en formato *.step*, para su correcto manejo en Ansys como un único sólido donde luego se debe generar el dominio.

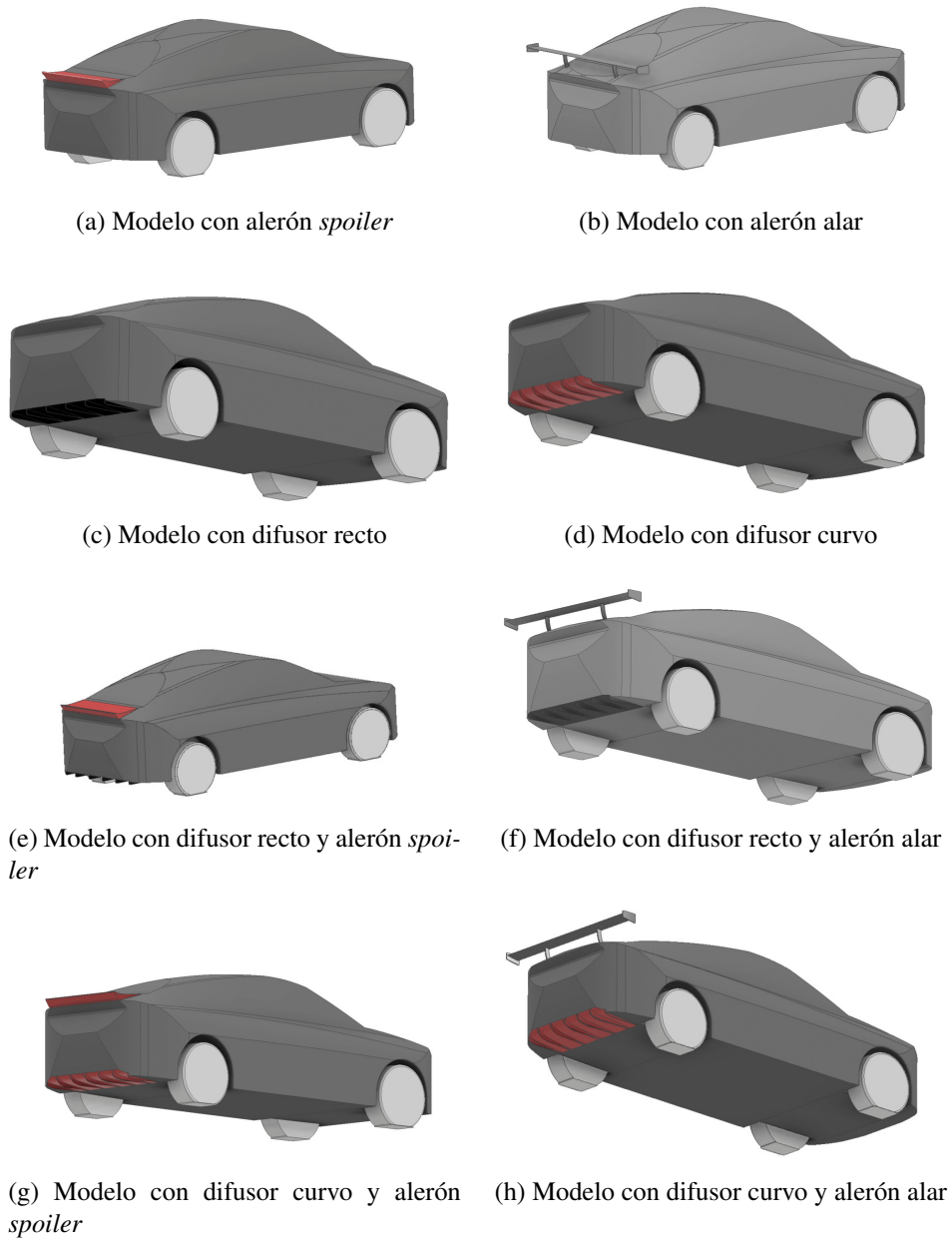


Figura 4.10: Modelos del vehículo

Donde dependiendo del apéndice a instalar, se hacen ciertos ajustes mediante herramientas como *Loft* o *Fillet* para tratar las zonas problemáticas como se muestra a continuación:

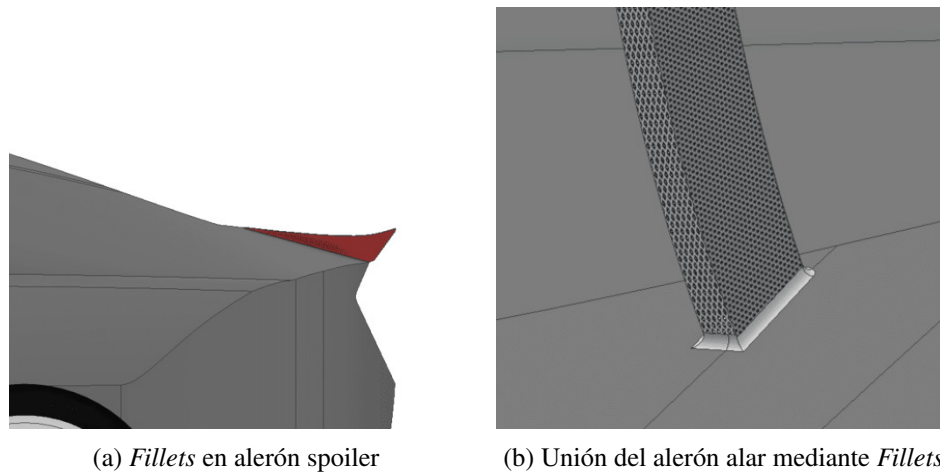


Figura 4.11: Arreglos de zonas problemáticas

Los parámetros relevantes de los modelos para el desarrollo del trabajo se exponen a continuación:

Tabla 4.1: Parámetros del vehículo

Parámetro	Valor	Unidad
Largo del vehículo	4,676	m
Ancho del vehículo	1,789	m
Altura respecto al suelo	200	mm
Área transversal	2,126	m^2
Área transversal con alerón 2	2,142	m^2

4.2. Numeros Adimensionales

Teniendo las dimensiones de los modelos, Tabla de parámetros 4.1, y las velocidades a estudiar especificadas en la sección 2.8, se pueden calcular los números adimensionales que rigen al problema según las ecuaciones especificadas en la misma sección.

Tabla 4.2: Números adimensionales en el problema

Velocidad [km/h]	Velocidad [m/s]	Número de Reynolds	Número de Mach
60	16,67	$5,1 \cdot 10^6$	0,05
80	22,22	$6,8 \cdot 10^6$	0,06
100	27,78	$8,5 \cdot 10^6$	0,08
120	33,33	$1,0 \cdot 10^7$	0,10

El numero de Reynolds indica que en todas las velocidades a estudiar se tiene un régimen turbulento, mientras los resultados respecto al número de Mach demuestra que el fluido efectivamente es incompresible.

4.3. Configuración del Dominio

Como fue mencionado en la sección de Aplicación de CFD 2.4, se debe estudiar los fenómenos en un ambiente lo suficientemente grande para poder presenciar todas las interacciones que ocurren alrededor de un automóvil y el aire. No existe un acuerdo concreto para definir que tan grande debe ser el dominio a definir, pero considerando dimensiones utilizadas en diferentes estudios ([12], [15] y [13]) se tienen las siguientes consideraciones.

- Se destaca la importancia del flujo luego que pasa por el vehículo, donde se utilizan largos de 4 a 8 veces el largo del vehículo.
- Existen diferentes configuraciones utilizadas para que el flujo se desarrolle antes de contactar con el vehículo desde 2 a 4 veces el largo del vehículo, pero se destaca que esta zona es menos importante que la zona trasera del vehículo.
- En cuanto a las dimensiones de ancho y alto hay una gran discrepancia, pero estas dimensiones son catalogadas como menos importantes.

Para definir los dominios se usan planos de referencia en los modelos de los vehículos, ubicados estratégicamente en el parachoques del vehículo y a lo largo de este.

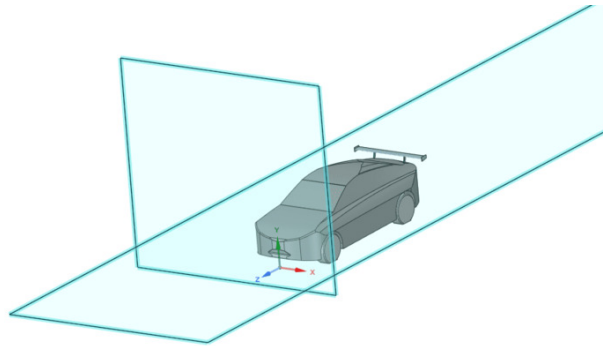
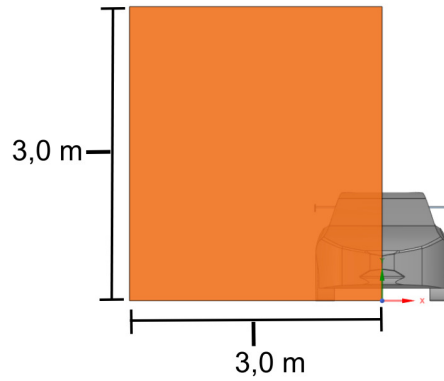


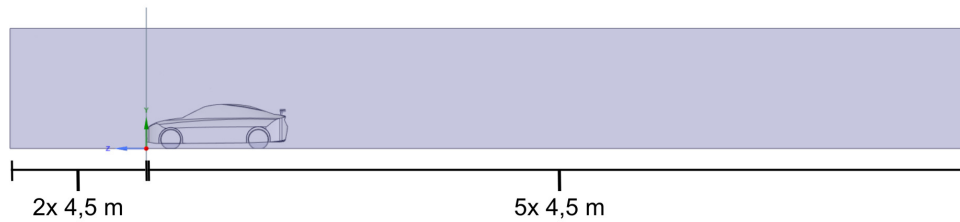
Figura 4.12: Definición de planos de referencia

Estos planos son constantes para cada permutación de modelo generado y se usan para definir las dimensiones del dominio. Para trabajar con medidas más exactas, se considero un largo del vehículo como 4,5 [m] solo para definir el dominio.

- Una distancia de 5 veces el largo del vehículo respecto al plano frontal para la parte posterior del dominio y 2 veces el largo del vehículo para la parte frontal. Generando un dominio de 31,5 [m] de largo.
- Una distancia vertical de 3 metros respecto al plano del piso.
- Una distancia horizontal de 3 metros respecto al plano divisorio.



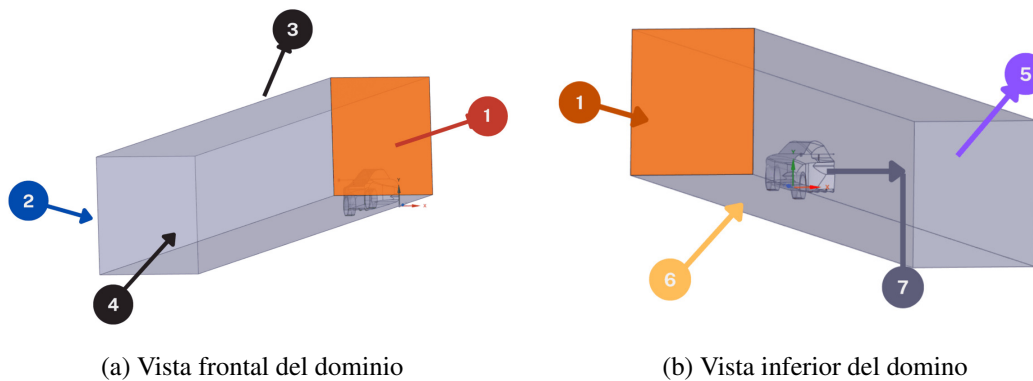
(a) Ancho y largo del dominio



(b) Largo del dominio

Figura 4.13: Dominio utilizado para el estudio de independencia

Adicionalmente, en cada dominio se deben establecer las siguientes *Named Selections*, las cuales definen las zonas de la geometría a las que corresponderán los condiciones de borde. Estas se exponen en el siguiente diagrama.



(a) Vista frontal del dominio

(b) Vista inferior del dominio

Figura 4.14: *Named Selections* en el dominio

- **Named Selection 1:** Entrada del aire al dominio *inlet*.
- **Named Selection 2:** Salida del aire del dominio.
- **Named Selection 3 y 4:** Paredes exteriores del dominio, las cuales están en contacto con el aire exterior.
- **Named Selection 5:** Pared de simetría, la cual divide el problema para disminuir los tiempos de cálculo.

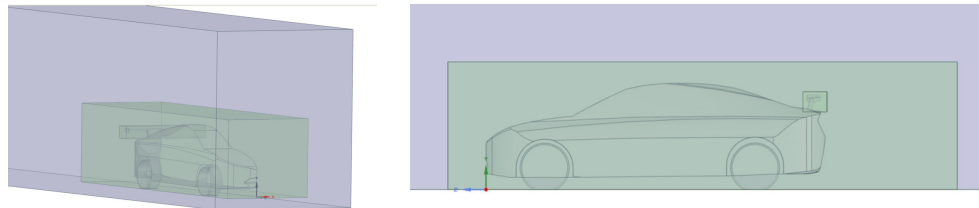
- **Named Selection 6:** Pared móvil para representar el movimiento del pavimento.
- **Named Selection 7:** Cuerpo del vehículo estático.

Estas selecciones serán integradas durante la etapa de *Setup* de Ansys Fluent bajo la siguiente criterio:

Tabla 4.3: Descripción de condiciones de borde

#	Condición de borde	Descripción
1	<i>inlet</i>	Corresponde a la zona de entrada del aire donde se define la velocidad y las turbulencias [m/s]
2	<i>outlet</i>	Se define como condición de salida el aire a presión atmosférica
3 y 4	<i>slip-wall</i>	Se definen como pared deslizante con esfuerzo fijo equivalente a 0 [Pa] de modo de no generar esfuerzos cortantes no existentes.
5	<i>symm-wall</i>	Establecida como simetría para disminuir costo computación considerando el hecho de que el problema es simétrico respecto al plano horizontal.
6	<i>moving-wall</i>	Se establece como pared móvil deslizante con una velocidad igual a la de entrada del flujo.
7	<i>wall</i>	Se define la geometría del vehículo como pared sólida para recrear la interacción con el camino.

También se definen otras geometrías para demarcan zonas de tratado de malla, las cuales son llamadas *cuerpos de influencia (Body of Influence)*, que incluyan a las geometrías que se consideran más problemáticas; en este caso se considera la zona alrededor el auto y otra más pequeña que contenga a la zona donde se ubicarán los alerones.



(a) Cuerpos de influencia

(b) Vista lateral de los cuerpos de influencia

Figura 4.15: Cuerpos de Influencia en el dominio

4.4. Estudio de Independencia del Mallado

Debido a la complejidad presente en la geometría del vehículo, los resultados al utilizar CFD pueden variar debido a la naturaleza de iteración por nodos utilizada, por lo que si el mallado genera puntos de cálculo lejanos a la geometría, las ecuaciones de movimiento pueden entregar resultados incorrectos en aquellas zonas irregulares.

Para buscar la convergencia del modelo independiente de la malla utilizada, se hace uso del modelo del vehículo con el alerón alar y el difusor curvo instalado, correspondiendo a la geometría más compleja, en el dominio especificado y se procede a hacer el estudio de independencia del mallado, donde se busca que los resultados de las fuerzas, coeficientes aerodinámicos y las métricas de calidad estén dentro de cierto rango bajo diferentes mallas, ya sea variando su calidad, zonas de refinado, capas de refinado en torno al vehículo, agregando inflación, etcétera, siendo estas técnicas

exploradas previamente ([10] y [12]).

Las mallas configuradas son detalladas a continuación:

- Malla Base: Corresponde a la malla predeterminada que Ansys determina apropiada para el objeto a mallar, con un tamaño de elemento objetivo de 1,3 [m].
- Malla con zona refinada: Se utiliza un cuerpo de influencia para hacer un mallado más fino en las zonas más problemáticas, teniendo en mente la geometría del alerón alar cuyo borde genera zonas con baja calidad. A esta zona se le da un *sizing* de 0,006 [m].
- Malla con *Inflation* y zona refinada en alerón: A la malla anterior se le agregan capas de inflación para encontrar los valores en la capa límite próximos a la carrocería [12] y así mejorar los resultados. La opción de inflación utilizada se describe a continuación:

Tabla 4.4: Selección de opciones de Inflation

Parámetro	Valor
Type	First Aspect Ratio
Layers	5
Growth Rate	0,8

Lo que genera capas de inflación delgadas, pero estas presentan un par de irregularidades.

- Malla con *Inflation* y refinado múltiple: Esta configuración busca generar una gran cantidad de elementos para una mayor precisión. Presenta un refinado de 0,4 [m] alrededor del vehículo según el cuerpo de influencia, un refinado levemente más fino en torno al alerón de 0,005 [m], y una inflación con un crecimiento menor de 0,6.

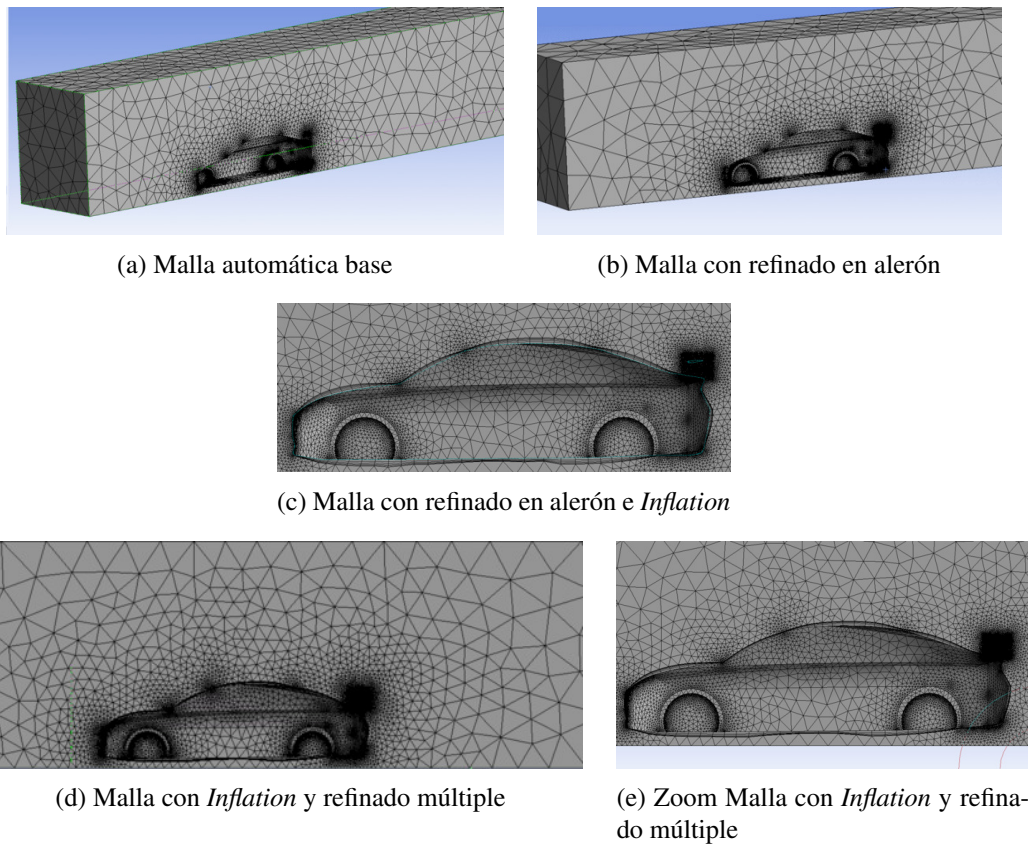


Figura 4.16: Mallas utilizadas para el estudio de independencia

Tabla 4.5: Resumen de Mallas

Malla	Refinamiento	Inflation	Tamaño de elemento [m]	Calidad Ortogonal Mínima	Skewness Máximo	Skewness Promedio	Calidad Mínima	Calidad Promedio	Número de Elementos	Nodos
Malla Base	-	-	1,3	$8,98 \cdot 10^{-3}$	0,9978	0,23024	$2,03 \cdot 10^{-2}$	0,83952	972443	181710
Malla con zona refinada	En alerón 6 mm	-	1	$2,13 \cdot 10^{-2}$	0,9787	0,20715	$4,46 \cdot 10^{-2}$	0,85122	4551889	784197
Malla con Inflation y zona refinada en alerón	En alerón 6 mm	5 capas con crecimiento 0,8	1	$2,39 \cdot 10^{-2}$	0,9761	0,21157	$1,01 \cdot 10^{-2}$	0,80609	4739996	925912
Malla con Inflation y refinado múltiple	En alerón 5 mm En auto 0,4 m	5 capas con crecimiento 0,6	0,5	$3,16 \cdot 10^{-2}$	0,9684	0,20776	$4,02 \cdot 10^{-3}$	0,81638	7468530	1410621

4.4.1. Configuración de Ansys

Una vez se tiene una malla preparada, se pasa al entorno de *Setup* para la configuración antes de comenzar a iterar. El modelo utilizado corresponde a $k - \epsilon$ donde adicionalmente se utilizaron los criterios *Realizable* y el tratamiento de pared *Enhanced Wall Treatment* en la pestaña de selección de modelo en el apartado correspondiente, además de utilizar el método SIMPLEC con discretizaciones de segundo orden. Esta configuración de modelos fue elegida por la propia recomendación de Ansys, ya que ayudan con problemas que consideran altas velocidades y geometrías medianamente complejas, en conjunto con recomendaciones de mallado en casos vehiculares (referencias [10]) y estudios previos ([12] y [14]).

Adicionalmente, se cambian los valores de referencia por aquellos en la tabla 4.6. De esta manera Ansys puede calcular de mejor manera fuerzas y coeficientes, indicando manualmente las dimensiones del automóvil. En concreto; *Area* se reemplaza por área transversal del vehículo, *Length* el largo del vehículo y *Velocity* la velocidad de entrada del aire inicial, la cual será considerada como 100 [km/h], otros valores se dejan intactos.

Tabla 4.6: Valores de referencia para el vehículo con alerón

Parámetro de referencia	Valor
Área	1,071 m^2
Densidad	1,225 kg/m^3
Enthalpy	0 J/kg
Length	4,676 m
Pressure	0 Pa
Temperature	288,16 K
Velocity	27,78 m/s
Viscosity	1,79 $\cdot 10^{-5} kg/ms$
Ratio of Specific Heats	1,4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300
Reference Zone	enclosure_fluid-domain

En el apartado de condiciones de borde, se introducen los datos y parámetros establecidos anteriormente (4.3) fijando una intensidad de 0,5 % y una ratio de viscosidad turbulenta de valor 2,0 en *inlet* asumiendo que el aire no se encuentra con irregularidades.

Para definir el paso del tiempo (*timestep*), se toma el largo del túnel de viento y considerando que el aire se encuentra a 100 [km/h] (27,78 [m/s]), se calculó el tiempo necesario para recorrer 2 veces el túnel completo para determinar un paso de tiempo lo suficientemente pequeño.

$$t_{tunnel} = \frac{l_{tunnel}}{v} \quad (4.1)$$

$$t_{tunnel} = 0,315 [s] \quad (4.2)$$

$$t_{timestep} = \frac{2 \cdot t_{tunnel}}{1000} \quad (4.3)$$

$$t_{timestep} = \frac{0,630}{1000} \quad (4.4)$$

$$t_{timestep} = 0,00063 [s] \quad (4.5)$$

- t_{tunnel} es el tiempo para que una partícula de aire recorra el túnel.
- v es la velocidad del aire (27,78 [m/s]).
- l_{tunnel} es largo del túnel (31,5 [m]).
- $t_{timestep}$ corresponde al paso de tiempo a utilizar.

Así, en el caso transiente se introduce este valor en el apartado *Run Calculation* y se programa para calcular durante más de 1000 *timesteps* para recorrer el túnel, la configuración completa para los cálculos de la simulación se dan a continuación:

Tabla 4.7: Configuración de Run Calculation

Parámetro	Selección
Type	Fixed
Method	User-Specified
Number of Time Steps	1000
Time Step Size [s]	0,00063
Max Iterations/Time Step	15
Reporting Interval	1
Profile Update Interval	0

4.4.2. Resultados Independencia de Malla

Con las mallas y la configuración definida, se ejecuta la simulación para las diferentes mallas. Los parámetros de calidad y convergencia de resultados se exponen en el Anexo C, mostrándose las siguientes tablas a modo de resumen:

Tabla 4.8: Comparación de resultados en Dirección Z

Malla	Coefficiente Arrastre (CD)	Fuerza eje Z [N]	Error CD c/r a mejor malla
Malla Base	0,38285	-193,816	8,0 %
Malla con zona refinada	0,37151	-188,075	4,8 %
Malla con Inflation y zona refinada en alerón	0,35984	-182,168	1,5 %
Malla con Inflation y refinado múltiple	0,35464	-179,537	-

Tabla 4.9: Comparación de resultados en Dirección Y

Malla	Coefficiente Sustentación (CL)	Fuerza eje Y [N]	Error CD c/r a mejor malla
Malla Base	0,04270	21,616	-58,2 %
Malla con zona refinada	0,08532	43,191	-16,4 %
Malla con Inflation y zona refinada en alerón	0,10318	52,236	1,1 %
Malla con Inflation y refinado múltiple	0,10206	51,668	-

Para cada malla se tienen las siguientes notas:

- Malla Base: Esta malla automática de Ansys genera métricas buenas si se consideran los promedios de Calidad y *Skewness*, sin embargo, el tamaño de los elementos impide que se malle correctamente el alerón alar, donde se generan mínimos de *Skewness* y baja calidad

que pueden resultar problemáticos (*Skewness* mayor a la recomendación máxima de 0,98 y Calidad ortogonal menor a 0,01). Sin embargo se procedió con la simulación la cual obtuvo fuerzas y coeficientes cercanos a otras mallas.

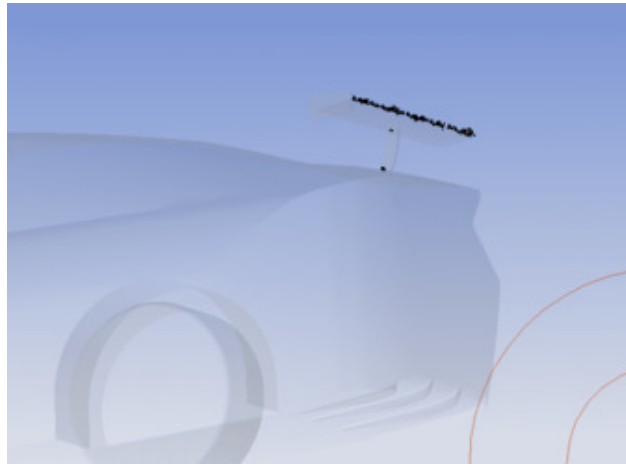


Figura 4.17: Elementos problemáticos en alerón

- Malla con zona refinada: Esta malla resuelve los problemas de calidad en el alerón pero por un leve margen (*Skewness* máximo de 0,978) además de eliminar el problema de la Calidad Ortogonal. Aunque como es de esperar, esto aumentó drásticamente la cantidad de elementos a alrededor de 4,5 millones, lo a que su vez conlleva un gran incremento del tiempo de cálculo que no es representado correctamente frente a la diferencia en los resultados, especialmente en el coeficiente y fuerza de sustentación.
- Malla con *Inflation* y zona refinada en alerón: Pese a tener un proceso de mallado extra, no se genera una gran diferencia en las métricas respecto a la malla con zona refinada en el alerón alar, pese a incrementar la cantidad de elementos a 4,7 millones. Más importante, se redujo el promedio de la calidad de elementos, lo que genera zonas que afectan la simulación.

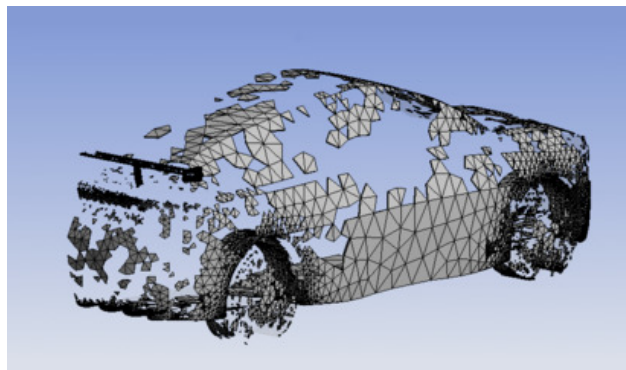


Figura 4.18: Zonas de calidad media baja

Sin embargo, en esta malla se comienza a apreciar una tendencia de los resultados, los cuales tienen una menor variación respecto a la malla anterior.

- Malla con *Inflation* y refinado múltiple: Como era de esperarse, esta malla mejoró las métricas de calidad frente a un gran aumento de la cantidad de elementos de 7,5 millones, lo que se ve

correspondido con un mayor tiempo de cálculo.

Siendo la malla más refinada, se observa que los valores de las fuerzas y coeficientes tienden a la convergencia, con una diferencia menor respecto a la malla anterior.

Con estos resultados se encuentran los valores a los que las fuerzas y coeficientes convergen a medida que se utiliza una malla más refinada, con las diferencias expuestas en la tablas de diferencia 4.8 y 4.9 entre la malla base y aquella más refinada al considerar los coeficientes, aunque se debe tener consideración con la sensibilidad de las fuerzas en el eje Y. Considerando estos puntos, es factible tomar la decisión de utilizar la malla más refinada con una disminución del tamaño de elemento en el alerón de manera de estar en el rango de convergencia sin alargar innecesariamente los tiempos de cálculo.

Adicionalmente, se observa que el dominio utilizado es más largo de lo necesario ya que se tiene una zona al final de este donde no ocurre mucha actividad, por lo que se puede reducir el dominio en un par de metros.

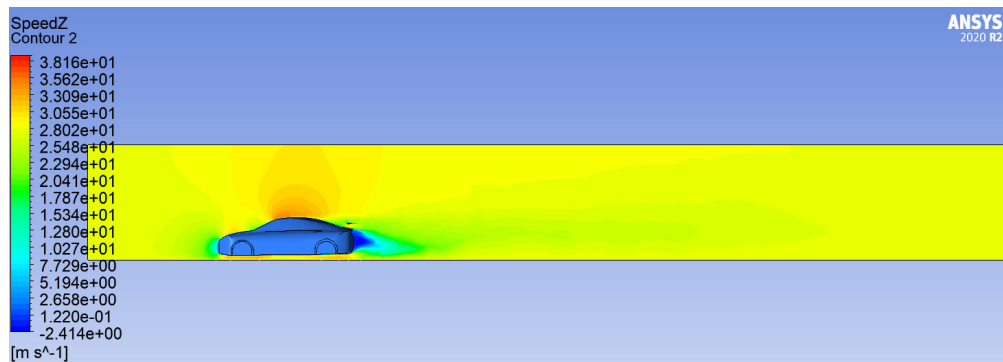


Figura 4.19: Contorno de velocidad en mejor malla

4.5. Estudio temporal del régimen

Debido al planteamiento del problema y que los valores de tanto coeficientes como fuerzas convergen cuando el aire alcanza una velocidad constante, es posible hacer la similitud a un estado estacionario para el estudio CFD.

La utilización de un régimen uniforme en CFD implicaría un gran reducción de los tiempos necesarios para generar los resultados, lo que es especialmente útil si se considera el gran número de casos a estudiar.

Sin embargo, dado el funcionamiento de Ansys también significaría que se utilizarían ciertas aproximaciones al resolver las ecuaciones gobernantes del fluido y esto quita relevancia al estudio.

Frente a esta impase, se decide analizar y comparar los resultados entregados por Ansys al simular en ambos casos (régimen estacionario y transiente), donde el tener una baja diferencia significaría que la aproximación es lo suficientemente correcta para ser utilizada y así se ahorraría una gran cantidad de tiempo y recursos.

Se utiliza la misma configuración usada en estudio de independencia de malla, donde se modifica el problema en *Setup* para resolver en un estado estacionario. Para encontrar los valores correctos de este régimen se considera un tiempo suficiente para que los residuos generados alcancen la convergencia bajo un criterio más riguroso.

- **Dominio:** Se utiliza el mismo dominio utilizado en el estudio de independencia de la malla, considerando el mismo modelo al ser el caso con geometría más complicada.
- **Mallado:** Para tener una mejor comparación se utilizó la misma malla definida con *Inflation* y refinado múltiple al dar los mejores resultados. Pese a ser la malla más elaborada, se busca que bajo este régimen permanente se aceleren los tiempos de cálculo necesarios.
- **Convergencia:** Dado que el régimen permanente hace uso de aproximaciones en los cálculos, se incrementa el criterio de convergencia de los residuos (continuidad, k , ϵ y fuerzas) a 10^{-5} para buscar una mayor validez de los resultados.
- **Setup:** Mientras se conservan las condiciones de borde, los definiciones de coeficientes y los métodos aplicados, el apartado *Run Calculation* cambia a un estado estacionario por lo que solo se define una cantidad de pasos a iterar, de los cuales se establece el simular durante 1000 y 5000 iteraciones para analizar la convergencia en el tiempo, ya que con la primera instancia no se alcanzan los criterios definido.

4.5.1. Resultados estudio temporal del régimen

Frente al primer estudio con 1000 iteraciones no se alcanza la convergencia de los residuos inicialmente, por lo que los resultados presentan anomalías tanto al analizar visualmente el comportamiento del aire (figura 4.20) como en las fuerzas presentes sobre el modelo. En base a esto se procede a hacer otro estudio con un número mayor de iteraciones.

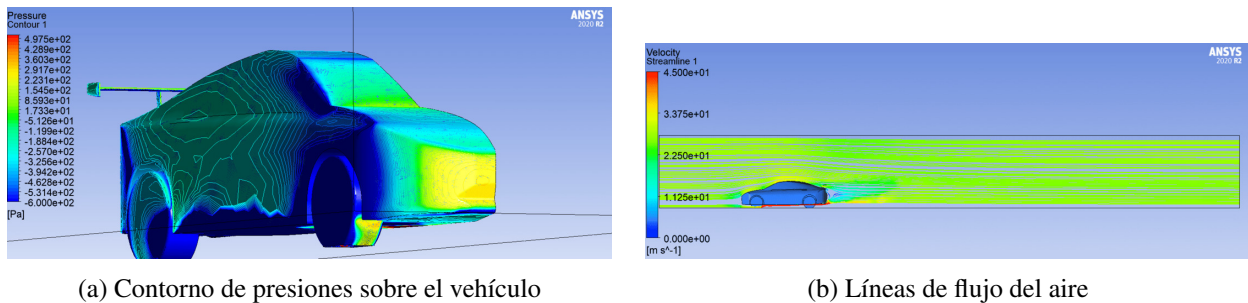
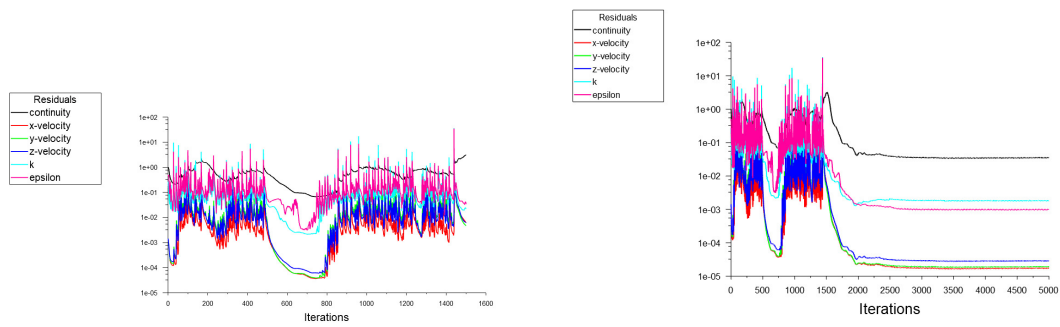


Figura 4.20: Resultados gráficos simulación estacionaria de 1000 iteraciones

Aún con 5000 iteraciones, debido a los criterios de convergencia definidos, la simulación no alcanza estos valores en tiempos de cálculo razonables, por lo no presenta una mejora respecto del caso transiente bajo la misma malla más refinada. A pesar de esto, al observar la figura 4.19 los residuos alcanzan la estabilidad luego de aproximadamente 2500 iteraciones a pesar de que la simulación completa no alcanza la convergencia de la continuidad dentro de las más de 12 horas de iteración, siendo incluso más largo que los tiempos de simulación transiente.



(a) Convergencia de residuos bajo 1000 iteraciones (b) Convergencia de residuos bajo 5000 iteraciones

Figura 4.21: Convergencia según iteraciones

Los resultados sobre las fuerzas de los estudios bajo régimen estacionario se expresan en la tabla 4.10. Como se puede observar, al comparar con los resultados del estudio bajo régimen transiente en las tablas 4.8 y 4.9, existe una pequeña diferencia entre los coeficientes de arrastre en régimen estacionario respecto al caso con 5000 iteraciones, sin embargo, existe mayor discrepancia respecto a la fuerza vertical generada, pero esta fuerza es bastante sensible a los cambios, pero al considerarlo le da una desventaja por lo que se descarta la utilización del régimen estacionario.

Tabla 4.10: Resultados de estudio régimen estacionario

Iteraciones	CD	Fuerza eje Z [N]	CL	Fuerza eje Y [N]	Tiempo de Iteracion [hr]
1000	0,70491	-356,857	-20,79471	-10527,199	5,0
5000	0,35229	-178,345	0,15690	79,429	12,5

Un punto a destacar es que bajo este régimen se obtiene una mayor estela de deformación del aire detrás del vehículo en comparación a los contornos de velocidad transiente. Sin embargo, esto no es suficiente razonamiento para utilizar este régimen por lo que se toma la decisión de descartar su uso.

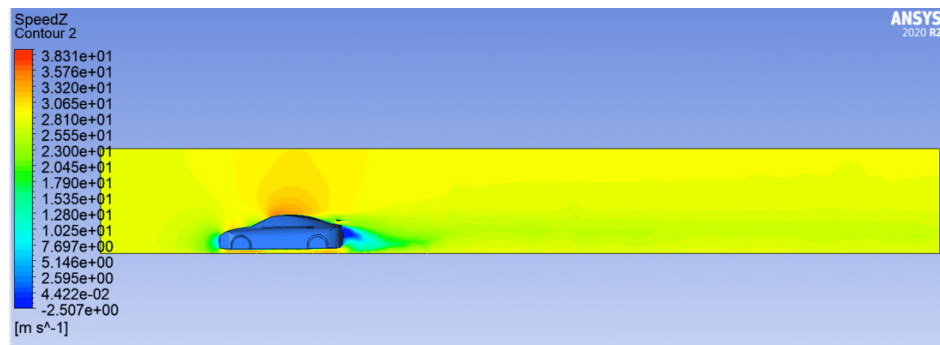


Figura 4.22: Contorno de velocidad en régimen estacionario

4.6. Configuración Final

Para definir los parámetros, dominios y metodología para llevar a cabo las simulaciones para todos los casos de manera sistemática, se toma en cuenta los resultados del análisis de independencia de malla y el estudio de régimen para establecer las siguientes instrucciones:

- Dominio: Se utilizará el mismo procedimiento utilizado en la sección 4.3 pero ajustando las dimensiones del dominio con el objetivo de estandarizar la creación del mismo, ya que como se observa en el Anexo C, ciertas zonas del dominio no presentan una mayor información en el estudio. Por lo que el dominio resultante tiene las siguientes dimensiones:

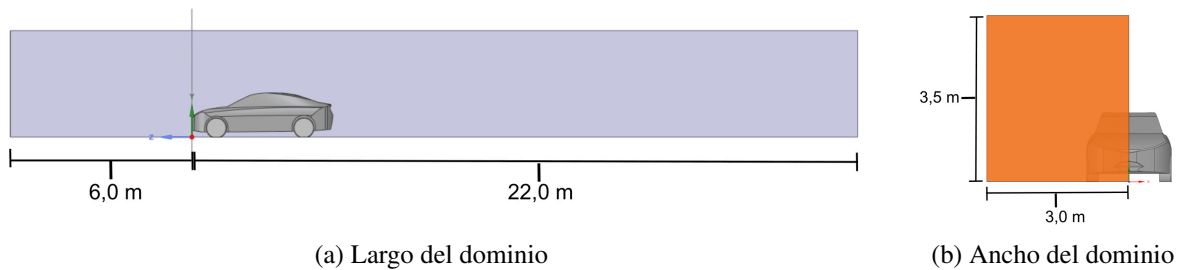


Figura 4.23: Dimensiones finales del dominio

- Malla: Se utiliza una malla similar a la *Malla con Inflation y refinado múltiple* explorada en el estudio de independencia de la malla, manteniendo los principales conceptos pero aumentando levemente el refinado alrededor del vehículo hasta 0,05 [m] buscando capturar el comportamiento del aire en la parte trasera del vehículo.
- Régimen transiente: Dado a los grandes tiempos de calculo del régimen estacionario y la ausencia de convergencia, se establece el uso del régimen transiente, lo que produce mejores resultados.

Con esto, las etapas para obtener los coeficientes y fuerzas de un modelo corresponde:

1. Configuración del dominio: Con los modelos ya creados, se crea un proyecto en Ansys y se exporta el modelo. Se hace un chequeo de la geometría para repararla automáticamente y así definir el dominio con las *Named Selections* establecidas.
2. Mallado: Una vez definido el dominio se procede a mallar el dominio al cual se le hacen los siguientes refinamientos:
3. Setup: Con la malla lista y con sus métricas adecuadas, dentro de setup se tienen los siguientes pasos:
 - a) Establecer el modelo a utilizar: $k - \varepsilon$ Realizable con tratamiento de pared *Enhanced Wall Treatment*.
 - b) Establecer y revisar condiciones de borde, verificando la simetría, ajustando la velocidad de la pared móvil, paredes sin esfuerzo y ajustando la intensidad (0,5 %) y turbulencias (2,0) en el inlet.
 - c) Ajustar los valores de referencia a los especificados en la siguiente tabla:

Tabla 4.11: Valores de referencia generales

Parámetro de referencia	Valor
Área	A determinar
Densidad	1,225 kg/m ³
Enthalpy	0 J/kg
Length	4,676 m
Pressure	0 Pa
Temperature	288,16 K
Velocity	A determinar m/s
Viscosity	1,79 · 10 ⁻⁵ kg/ms
Ratio of Specific Heats	1,4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300
Reference Zone	enclosure_fluid-domain

Donde los valores de Área dependerán del modelo; 1,071 [m²] para aquellos modelos que tengan el alerón alar y 1,063 [m²] para el resto; mientras que la velocidad dependerá de cada caso.

d) Se establecen los siguientes parámetros del apartado de métodos:

Tabla 4.12: Selección de apartado *Selection Methods*

Discretización	Valor
Presión	Segundo orden
Momentum	Segundo orden (Upwind)
Energía Cinética Turbulenta	Segundo orden (Upwind)
Ratio de Disipación Turbulento	Segundo orden (Upwind)

- e) Se crean los reportes para calcular las fuerzas y coeficientes de arrastre y sustentación.
- f) La simulación es inicializada mediante el método Híbrido (*Hybrid Initialization*).
- g) Con el resto de parámetros listos, se usan las ecuaciones ya determinadas (que son recordadas a continuación), para determinar los pasos de tiempo a utilizar para establecer los parámetros correspondientes a la pestaña *Run Calculation*.

$$t_{tunnel} = \frac{l_{tunnel}}{v} \quad (4.6)$$

$$t_{timestep} = \frac{2 \cdot t_{tunnel}}{1000} \quad (4.7)$$

- t_{tunnel} es el tiempo para que una partícula de aire recorra el túnel.
- v es la velocidad del aire en [m/s] que se está estudiando.
- l_{tunnel} es largo del túnel (28 [m]).
- $t_{timestep}$ corresponde al paso de tiempo a utilizar.

Tabla 4.13: Configuración de Run Calculation

Parámetro	Selección
Type	Fixed
Method	User-Specified
Number of Time Steps	1000
Time Step Size (s)	$t_{timestep}$
Max Iterations/Time Step	15
Reporting Interval	1
Profile Update Interval	0

Capítulo 5

Resultados

5.1. Vehículo Base

Con la configuración y parámetros finales definidos en la sección 4.6, se procede a hacer el estudio CFD del modelo base (Figura 4.4) con la configuración establecida para las diferentes velocidades. Estos resultados permiten obtener el comportamiento aerodinámico del vehículo de serie, proporcionando un estado de control sobre el cual se efectuarán las comparaciones de los efectos y/o mejoras generadas por las modificaciones.

La malla utilizada se exhibe en la figura a continuación con sus respectivas métricas en la tabla 5.1, aunque es importante notar que al ser el caso sin ninguna modificación, se tienen menos elementos que el mallado automático de Ansys no trata.

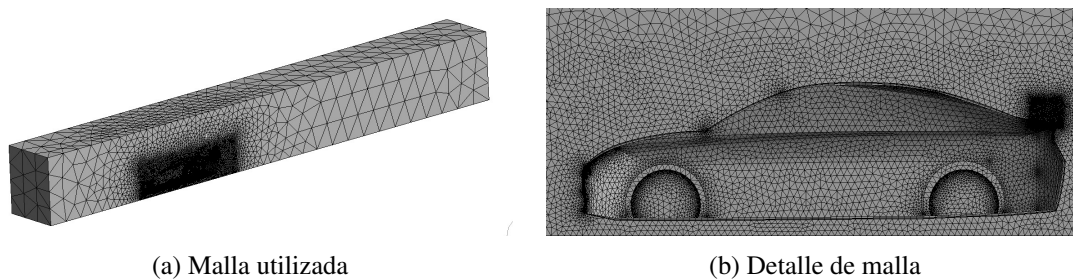


Figura 5.1: Métricas de malla del dominio del vehículo base

Tabla 5.1: Mallado del modelo base

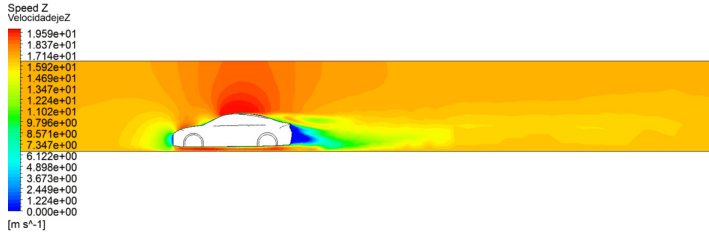
Refinamiento	Inflation	Tamaño de elemento [m]	Calidad ortogonal Mínima	Skewness Máximo	Skewness Promedio	Calidad Mínima	Calidad Promedio	Número de Elementos	Nodos
Alrededor del vehículo y en zona de alerón	5 Capas de crecimiento 0,8	0,5	$2,29 \cdot 10^{-2}$	0,97711	0,20934	$1,92 \cdot 10^{-2}$	0,82704	3117712	576297

Con el dominio mallado se lleva a cabo la simulación según la pauta establecida en la sección de configuración final 4.6, donde una vez terminada se duplica el entorno de Fluent para cambiar las condiciones de borde y parámetros de iteración a la siguiente velocidad. Los resultados numéricos de las fuerzas y coeficientes obtenidos por medio de la simulación del vehículo base a diferentes velocidades son expuestos en la siguiente tabla:

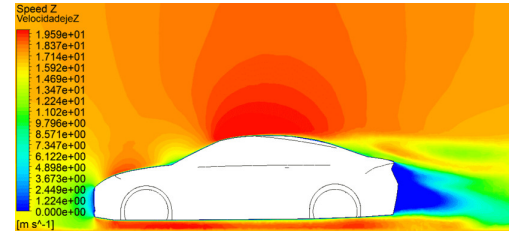
Tabla 5.2: Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo base

Velocidad [km/h]	Coefficiente de arrastre (CD)	Fuerza en eje Z [N]	Coefficiente de sustentación (CD)	Fuerza en eje y [N]
60	0,35021	-63,363	0,33320	60,287
80	0,34563	-111,105	0,32922	105,831
100	0,34387	-172,782	0,32348	162,534
120	0,34056	-246,325	0,31033	224,456

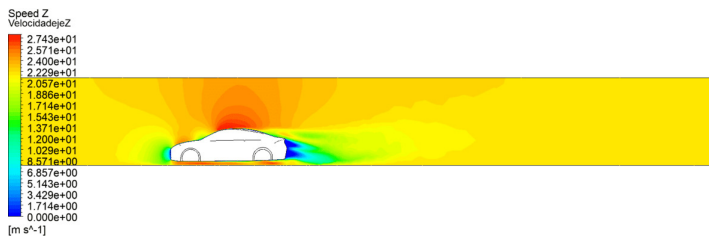
Pasando a la interacción vehículo-fluido, los resultados gráficos son expuestos a continuación. Las velocidades del flujo alrededor del vehículo corresponden:



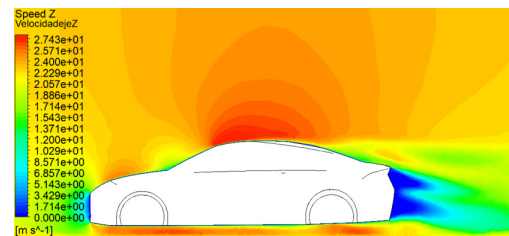
(a) Contorno de velocidad a 60 [km/h]



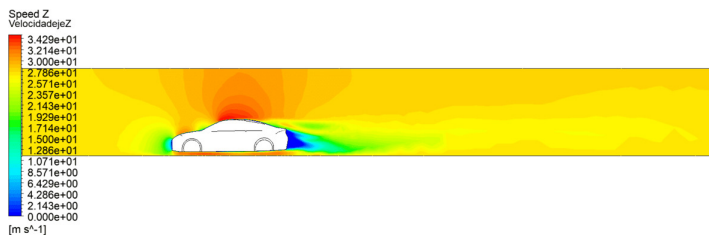
(b) Detalle de contorno a 60 [km/h]



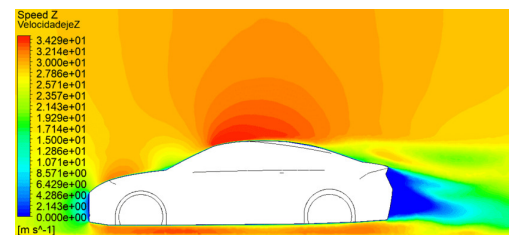
(c) Contorno de velocidad a 80 [km/h]



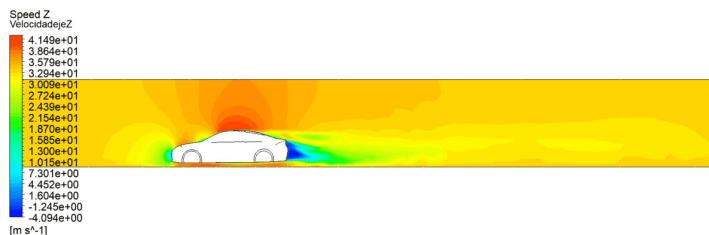
(d) Detalle de contorno a 80 [km/h]



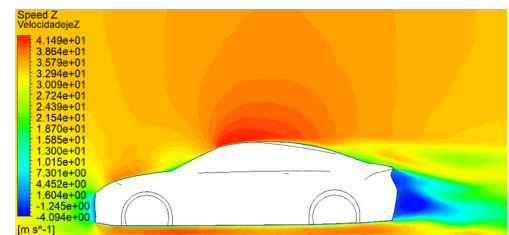
(e) Contorno de velocidad a 100 [km/h]



(f) Detalle de contorno a 100 [km/h]



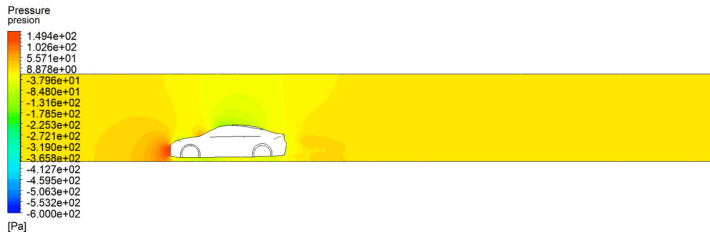
(g) Contorno de velocidad a 120 [km/h]



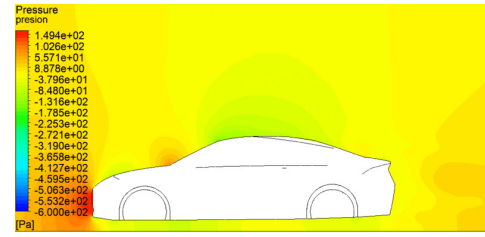
(h) Detalle de contorno a 120 [km/h]

Figura 5.2: Contornos de velocidad alrededor del vehículo base

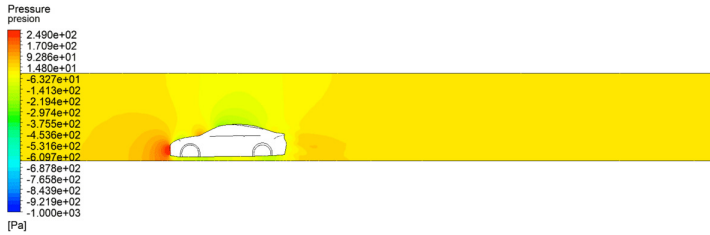
Mientras que a continuación se observan los contornos de presión estática, siendo relativa a aquella presente a la atmosférica rodeante.



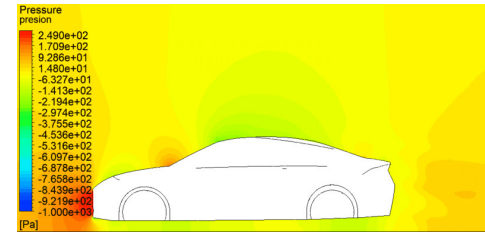
(a) Contorno de presión a 60 [km/h]



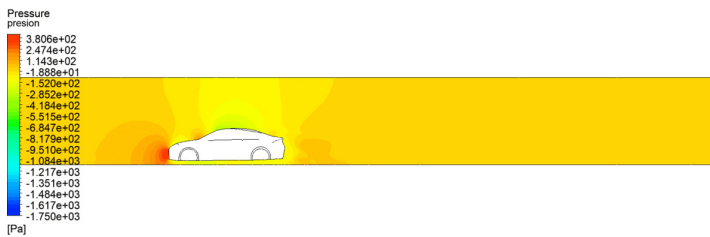
(b) Detalle de presión a 60 [km/h]



(c) Contorno de presión a 80 [km/h]



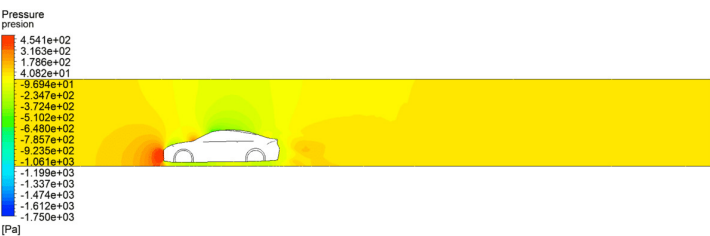
(d) Detalle de presión a 80 [km/h]



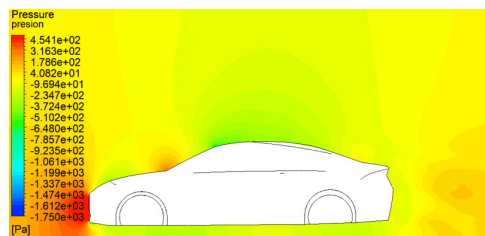
(e) Contorno de presión a 100 [km/h]



(f) Detalle de presión a 100 [km/h]



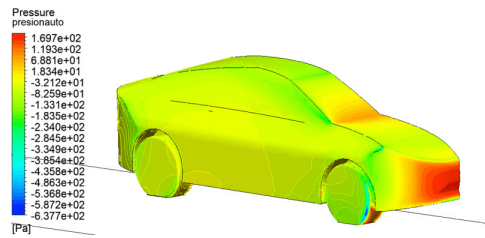
(g) Contorno de presión a 120 [km/h]



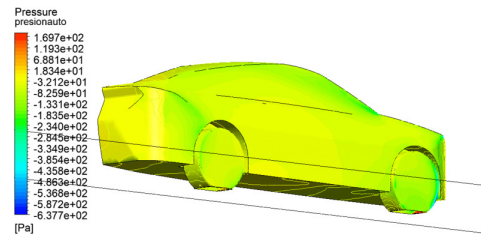
(h) Detalle de presión a 120 [km/h]

Figura 5.3: Contornos de presión alrededor del vehículo base

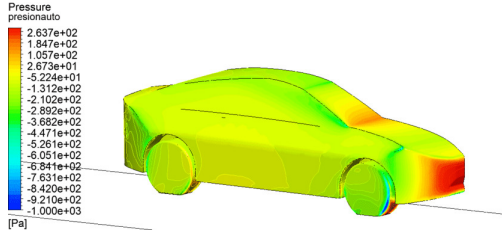
Con la siguiente figura siendo la representación de la presión relativa sobre la carrocería.



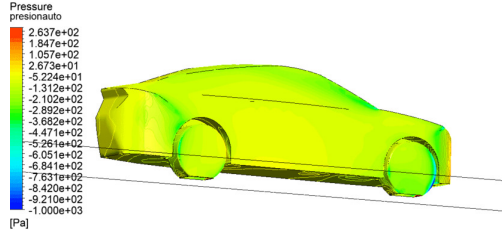
(a) Presiones en la área frontal a 60 [km/h]



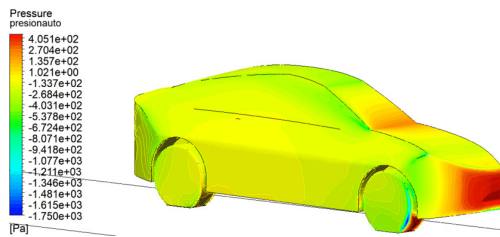
(b) Presiones en el área trasera a 60 [km/h]



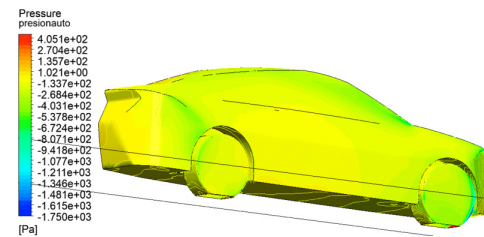
(c) Presiones en la área frontal a 80 [km/h]



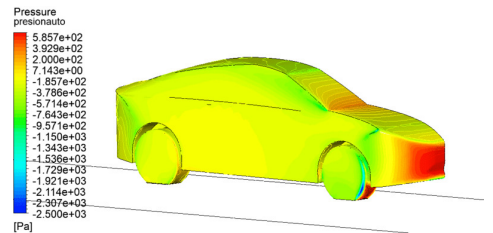
(d) Presiones en el área trasera a 80 [km/h]



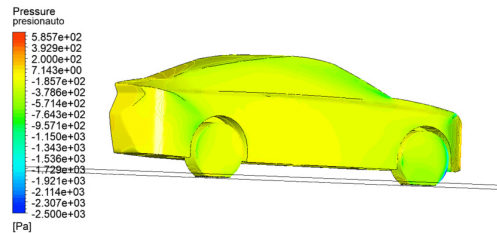
(e) Presiones en la área frontal a 100 [km/h]



(f) Presiones en el área trasera a 100 [km/h]



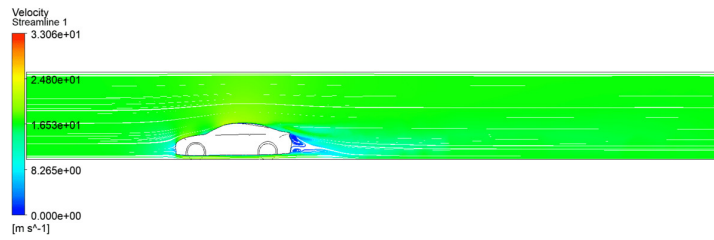
(g) Presiones en la área frontal a 120 [km/h]



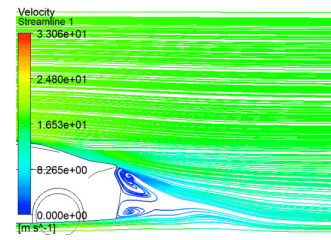
(h) Presiones en el área trasera a 120 [km/h]

Figura 5.4: Contornos de velocidad alrededor del vehículo base

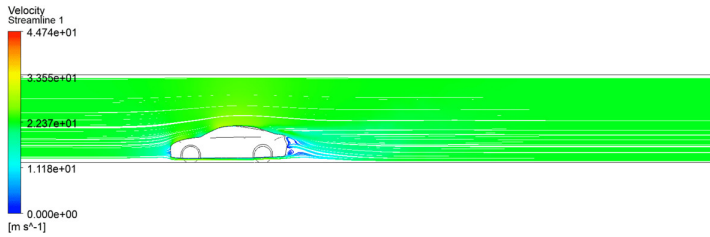
Las siguientes líneas de flujo permiten tener una representación gráfica de la interrupción del flujo



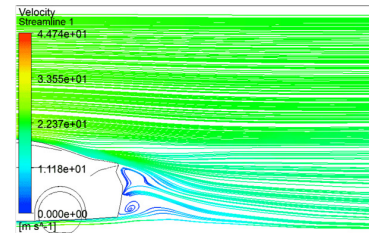
(a) Líneas de flujo a 60 [km/h]



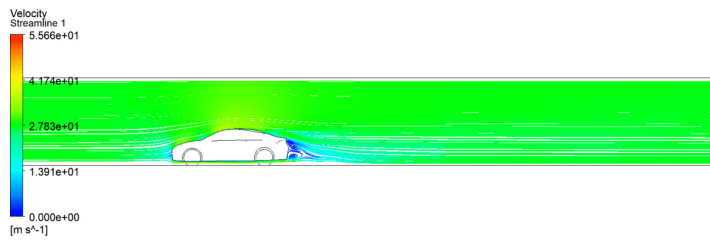
(b) Detalle de líneas de flujo a 60 [km/h]



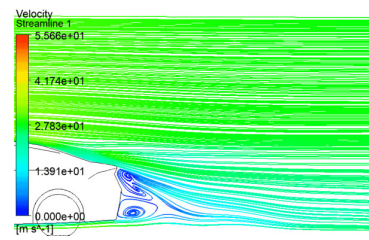
(c) Líneas de flujo a 80 [km/h]



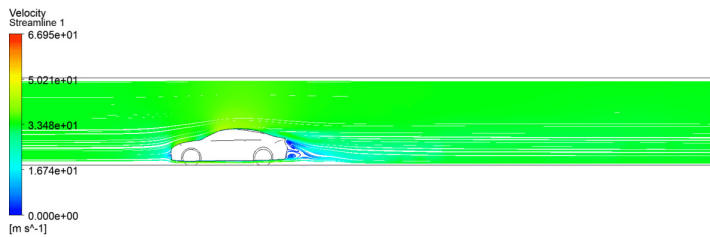
(d) Detalle de líneas de flujo a 80 [km/h]



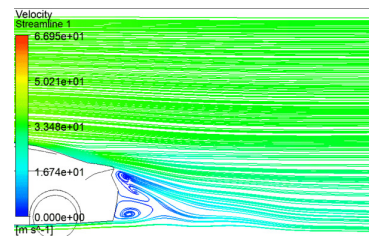
(e) Líneas de flujo a 100 [km/h]



(f) Detalle de líneas de flujo a 100 [km/h]



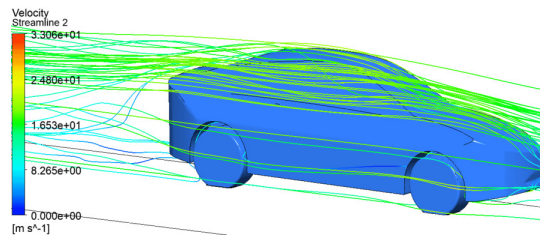
(g) Líneas de flujo a 120 [km/h]



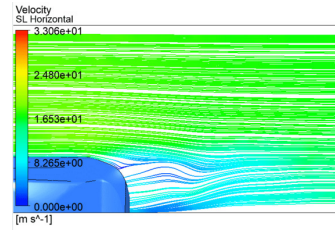
(h) Detalle de líneas de flujo a 120 [km/h]

Figura 5.5: Líneas de flujo horizontales alrededor del vehículo base

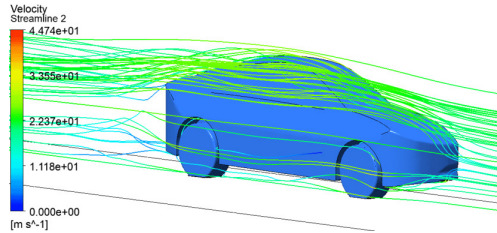
Por otro lado, en la siguientes imágenes se aprecia como las líneas de flujo se deforman al contactar con el vehículo.



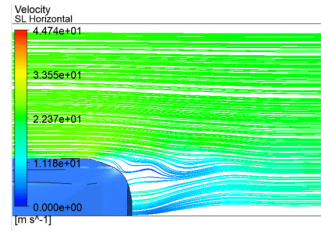
(a) Líneas de flujo en 3D a 60 [km/h]



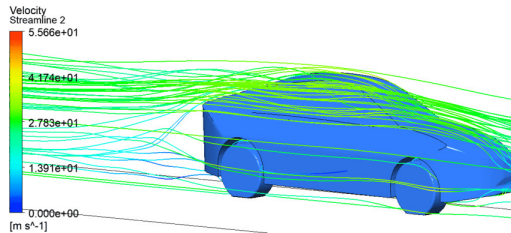
(b) Líneas de flujo en altura de un difusor a 60 [km/h]



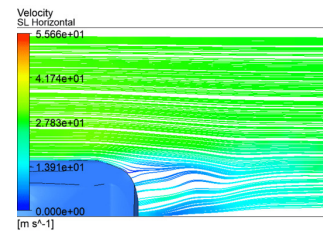
(c) Líneas de flujo en 3D 80 [km/h]



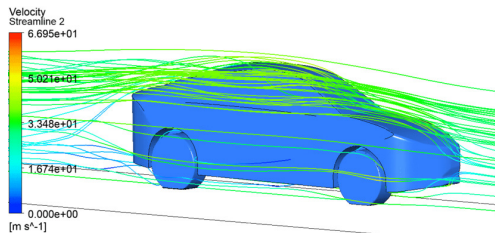
(d) Líneas de flujo en altura de un difusor a 80 [km/h]



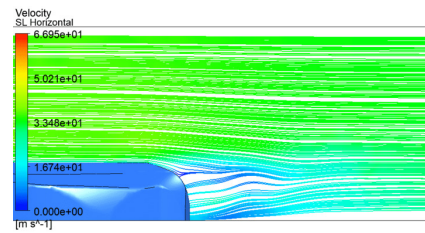
(e) Líneas de flujo en 3D a 100 [km/h]



(f) Líneas de flujo en altura de un difusor a 100 [km/h]



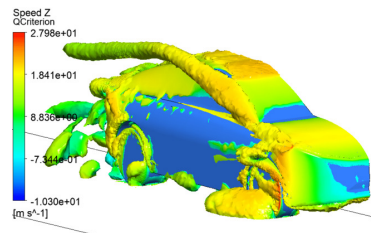
(g) Líneas de flujo en 3D a 120 [km/h]



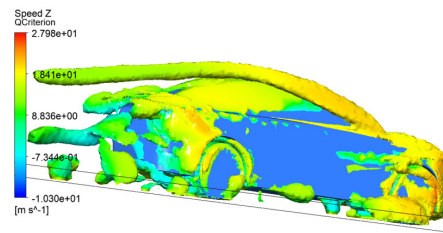
(h) Líneas de flujo en altura de un difusor a 120 [km/h]

Figura 5.6: Líneas de flujo 3D y en difusor en vehículo base

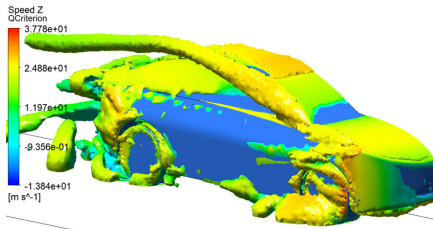
Para explorar el comportamiento en mayor profundidad, se estudia la presencia de turbulencias mediante su forma utilizando criterios de Vorticidad y Q-Criterion, en conjunto a la zonas con mayor energía.



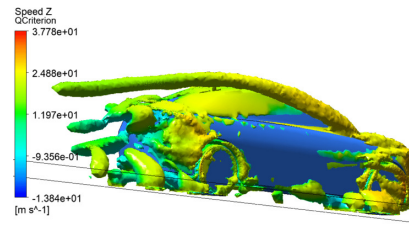
(a) Turbulencias según Q-Criterion a 60 [km/h]



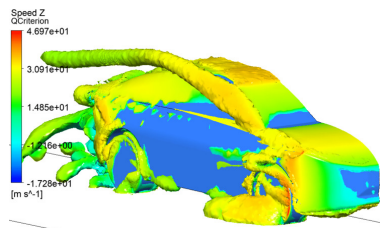
(b) Turbulencias en la parte trasera según Q-Criterion a 60 [km/h]



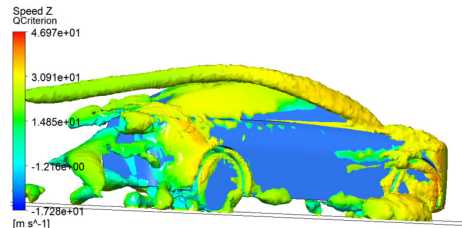
(c) Turbulencias según Q-Criterion a 80 [km/h]



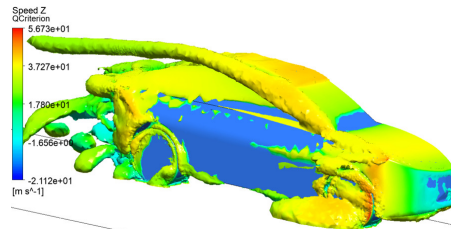
(d) Turbulencias en la parte trasera según Q-Criterion a 80 [km/h]



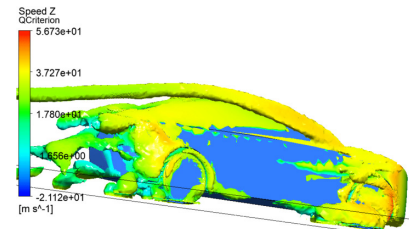
(e) Turbulencias según Q-Criterion a 100 [km/h]



(f) Turbulencias en la parte trasera según Q-Criterion a 100 [km/h]



(g) Turbulencias según Q-Criterion a 120 [km/h]



(h) Turbulencias en la parte trasera según Q-Criterion a 120 [km/h]

Figura 5.7: Turbulencias según Q-Criterion en el vehículo base

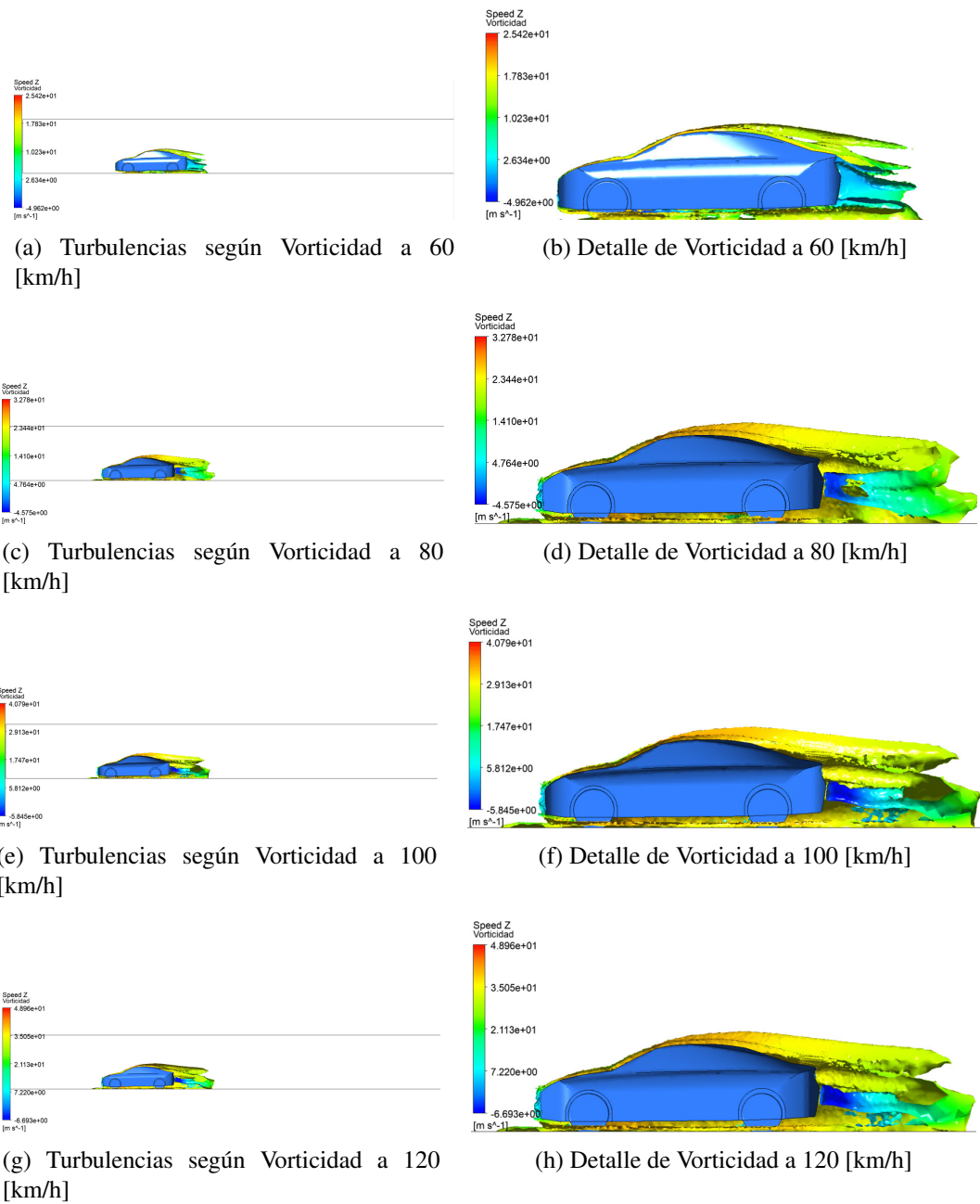


Figura 5.8: Vorticidad de turbulencias en el vehículo base

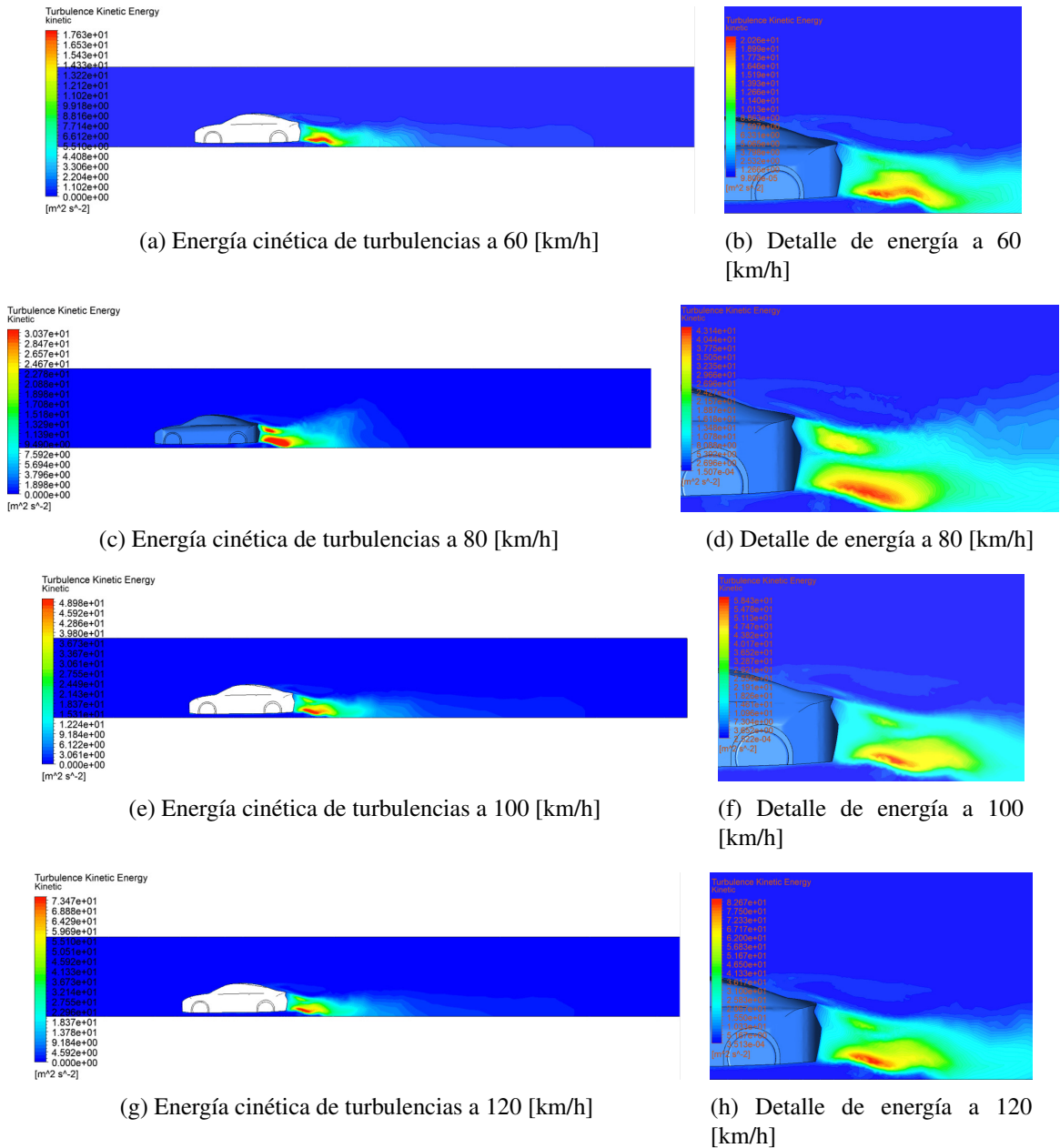


Figura 5.9: Vorticidad de turbulencias en el vehículo base

Prestando atención en las figuras de velocidad, presión y líneas de flujo no presentan mayores variaciones respecto a formas y contornos frente a los cambios del número de Reynolds, salvo el caso a 80 [km/h] pero puede ser producto de un error, por lo que se puede establecer que estos están determinados según el modelo por sobre las condiciones de velocidad del estudio. Este punto puede apreciarse mejor observando la extensión de los resultados en el Anexo E con los contornos de otros modelos.

Con este último punto, se puede establecer una línea de comparación sobre una única velocidad que permita observar y comparar como cada modificación cambia el flujo del aire. Para ello, se hacen comparaciones utilizando los resultados a 100 [km/h].

5.2. Vehículo con Difusor Recto

A continuación se describe la malla utilizada en conjunto con la configuración definida. Esta malla tiene una mayor concentración de elementos en la área del difusor.

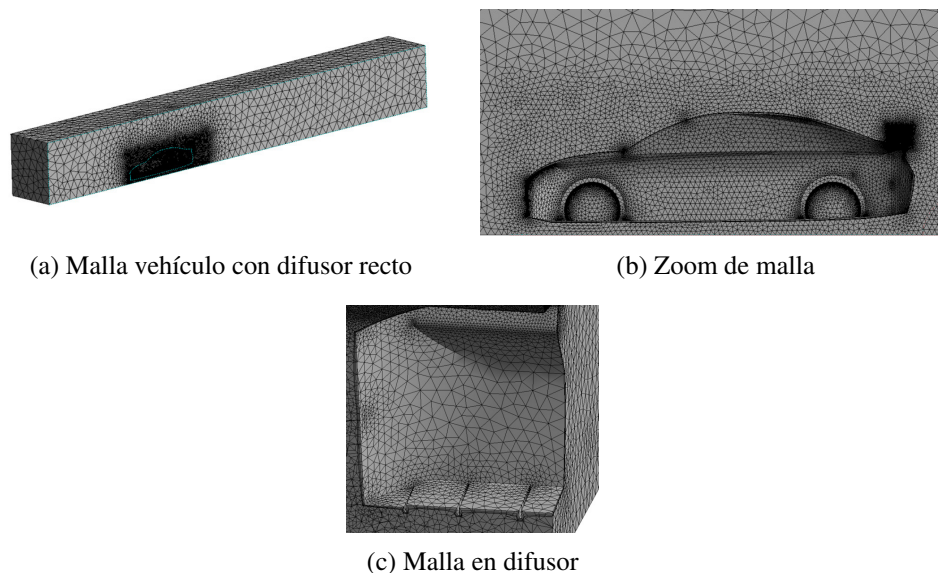


Figura 5.10: Mallado del dominio del vehículo con difusor recto

Tabla 5.3: Métricas de malla del modelo con difusor recto

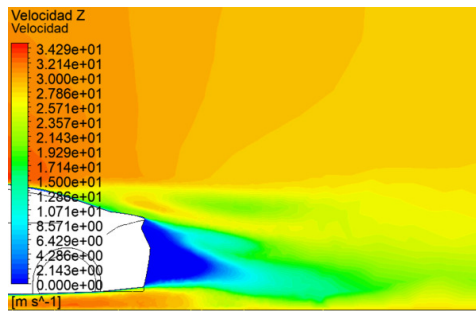
Refinamiento	Inflation	Tamaño de elemento [m]	Calidad ortogonal Mínima	Skewness Máximo	Skewness Promedio	Calidad Mínima	Calidad Promedio	Número de Elementos	Nodos
Alrededor del vehículo y en zona de alerón	5 Capas de crecimiento a 0,8	0,5	$3,14 \cdot 10^{-2}$	0,96862	0,21141	$1,68 \cdot 10^{-2}$	0,81766	3452747	657015

Efectuando la simulación, se obtienen los resultados numéricos:

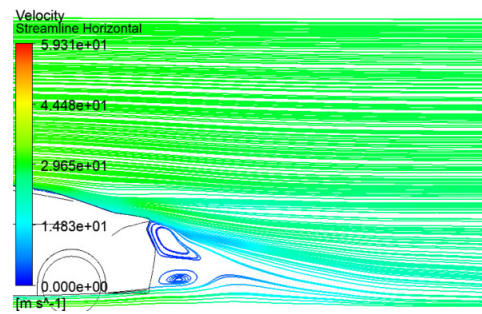
Tabla 5.4: Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con difusor recto

Velocidad [km/h]	Coficiente de arrastre (CD)	Fuerza en eje Z [N]	Coficiente de sustentación (CD)	Fuerza en eje Y [N]
60	0,35016	-63,355	0,29364	53,129
80	0,34646	-111,373	0,29784	95,743
100	0,34332	-172,506	0,30852	155,020
120	0,34061	-246,360	0,31434	227,359

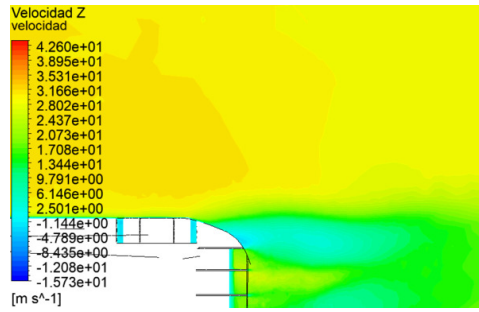
Por otro lado, los resultados gráficos considerando una velocidad de 100 [km/h] son los siguientes, exponiendo los resultados en las zonas más modificadas.



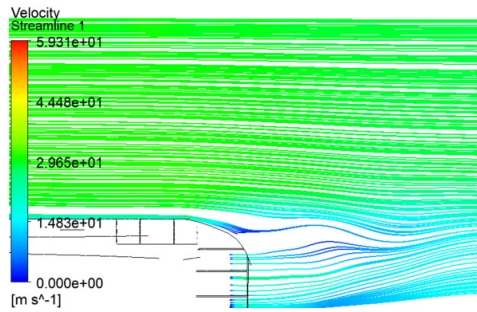
(a) Contorno de velocidad



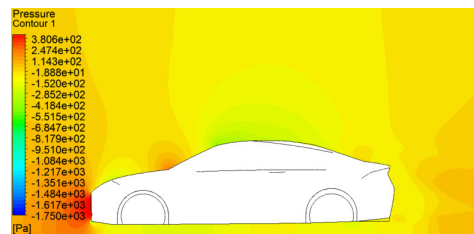
(b) Líneas de flujo



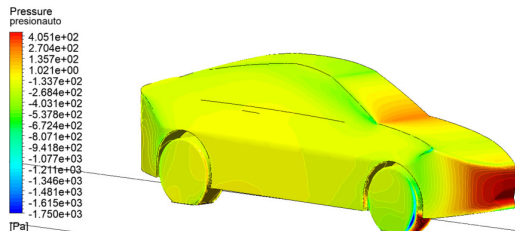
(c) Contorno de velocidad en altura de difusor



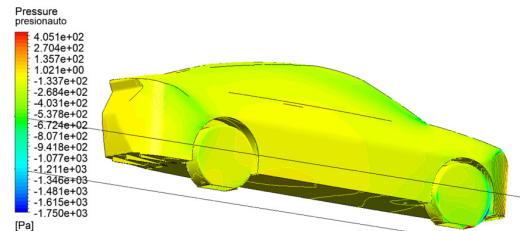
(d) Líneas de flujo en altura de difusor



(e) Contorno de presión



(f) Presión sobre la parte frontal del vehículo



(g) Presión sobre la parte trasera del vehículo

Figura 5.11: Resultados gráficos del vehículo con difusor recto a 100 [km/h]

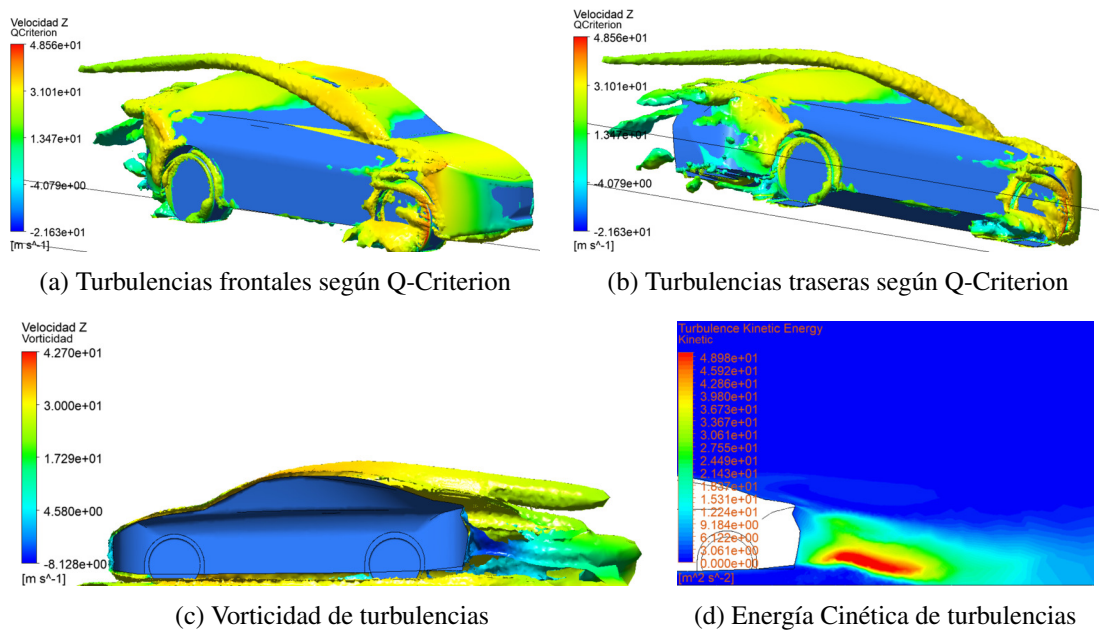
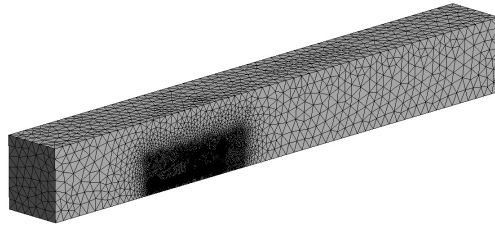


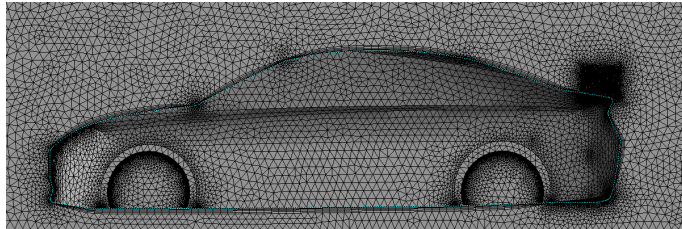
Figura 5.12: Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con difusor recto a 100 [km/h]

5.3. Vehículo con Difusor Curvo

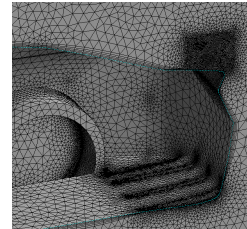
Se proporciona a continuación un análisis de la malla y los parámetros de calidad asociados.



(a) Malla vehículo con difusor curvo



(b) Zoom de malla



(c) Malla en difusor

Figura 5.13: Mallado del dominio del vehículo con difusor curvo

Tabla 5.5: Métricas de malla del modelo con difusor curvo

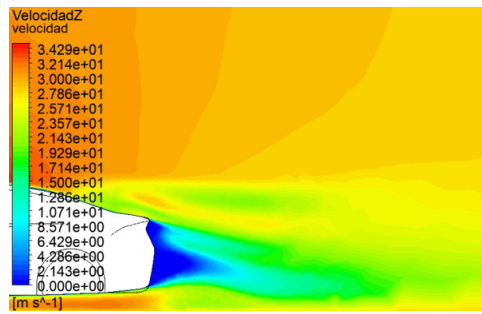
Refinamiento	Inflation	Tamaño de elemento [m]	Calidad ortogonal Mínima	Skewness Máximo	Skewness Promedio	Calidad Mínima	Calidad Promedio	Número de Elementos	Nodos
Alrededor del vehículo y en zona de alerón	5 Capas de crecimiento a 0,8	0,5	$3,42 \cdot 10^{-2}$	0,96576	0,21505	$1,14 \cdot 10^{-2}$	0,89994	3667613	751170

Mediante la simulación, se obtuvieron los siguientes resultados numéricos correspondientes:

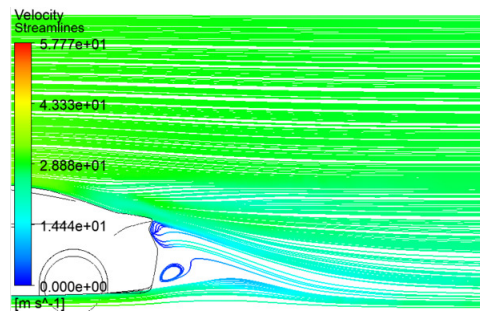
Tabla 5.6: Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con difusor curvo

Velocidad [km/h]	Coefficiente de arrastre (CD)	Fuerza en eje Z [N]	Coefficiente de sustentación (CD)	Fuerza en eje Y [N]
60	0,36259	-65,603	0,27988	50,639
80	0,36254	-116,543	0,27216	87,489
100	0,36023	-181,000	0,28200	141,697
120	0,35688	258,127	0,28202	203,979

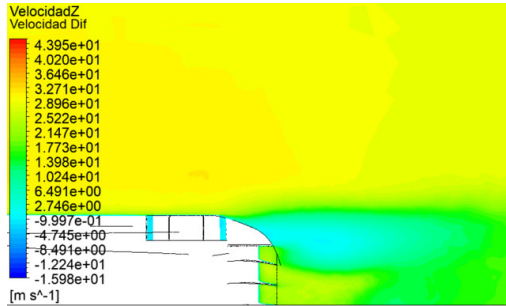
De la misma manera se llegan a los siguientes resultados gráficos:



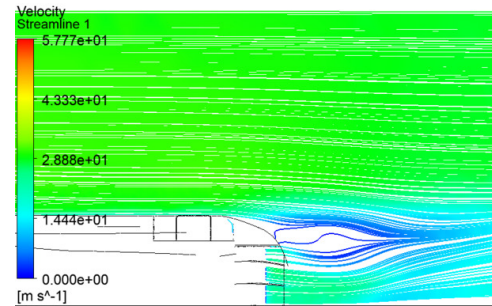
(a) Contorno de velocidad



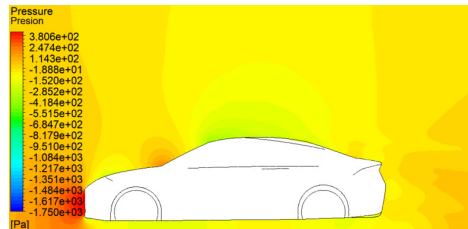
(b) Líneas de flujo



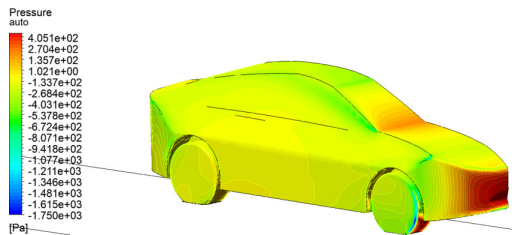
(c) Contorno de velocidad en altura de difusor



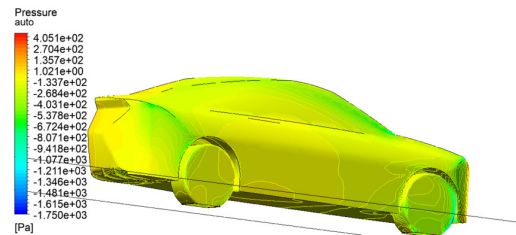
(d) Líneas de flujo en altura de difusor



(e) Contorno de presión



(f) Presión sobre la parte frontal del vehículo



(g) Presión sobre la parte trasera del vehículo

Figura 5.14: Resultados gráficos del vehículo con difusor curvo a 100 [km/h]

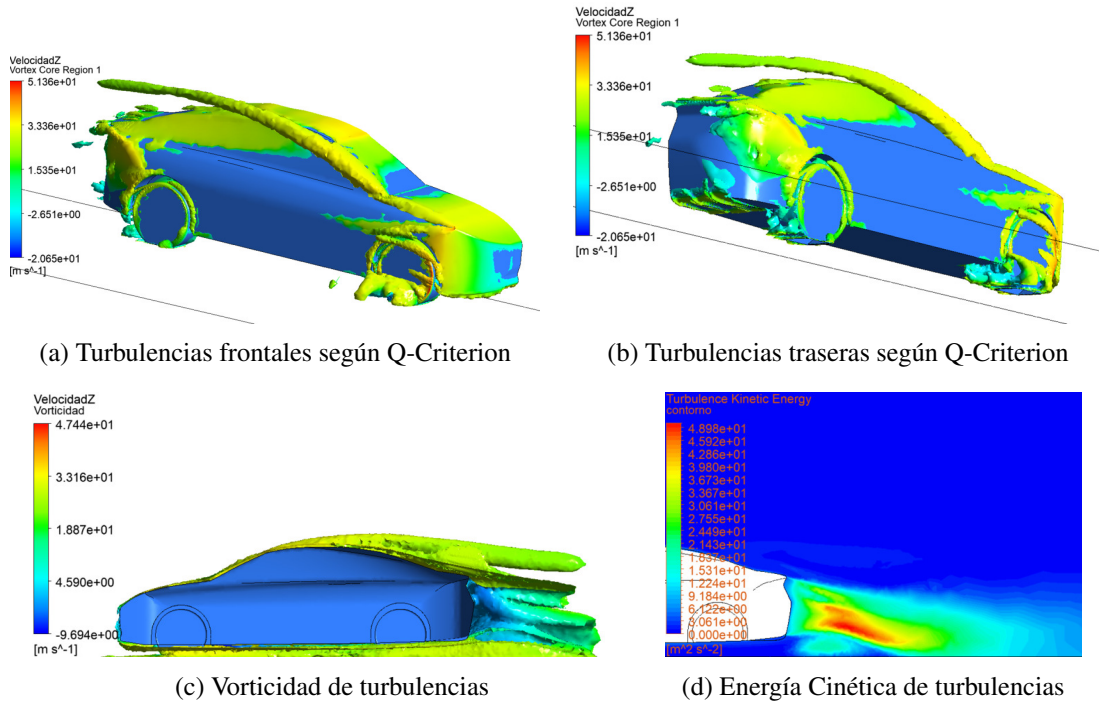
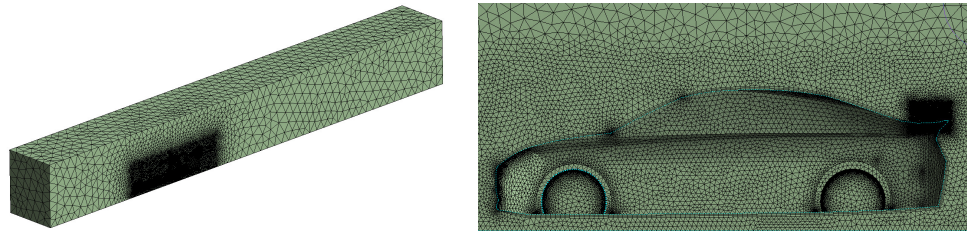


Figura 5.15: Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con difusor curvo a 100 [km/h]

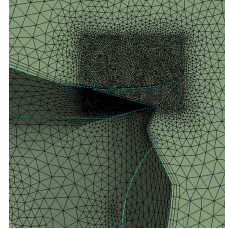
5.4. Vehículo con alerón spoiler

La respectiva malla y los parámetros relevantes de este caso son incluidos a continuación.



(a) Malla vehículo con alerón spoiler

(b) Zoom de malla



(c) Detalle en la zona del alerón

Figura 5.16: Mallado del dominio del vehículo con alerón spoiler

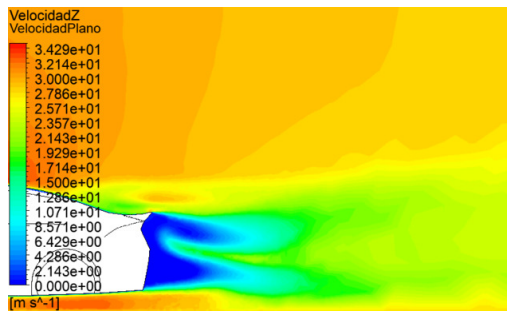
Tabla 5.7: Métricas de malla con alerón spoiler

Refinamiento	Inflation	Tamaño de elemento [m]	Calidad ortogonal Mínima	Skewness Máximo	Skewness Promedio	Calidad Mínima	Calidad Promedio	Número de Elementos	Nodos
Alrededor del vehículo y en zona de alerón	5 Capas de crecimiento a 0,8	0,5	$5,82 \cdot 10^{-2}$	0,94154	0,20697	$3,06 \cdot 10^{-2}$	0,83463	3117712	576297

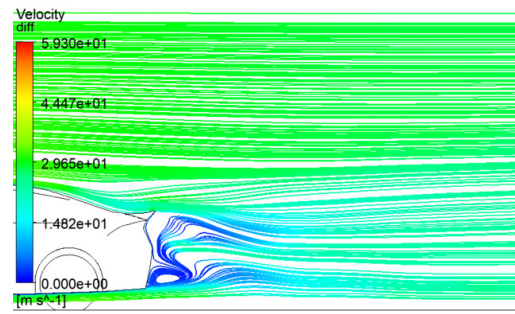
Tras las iteraciones, se generaron los siguientes resultados numéricos:

Tabla 5.8: Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con alerón spoiler

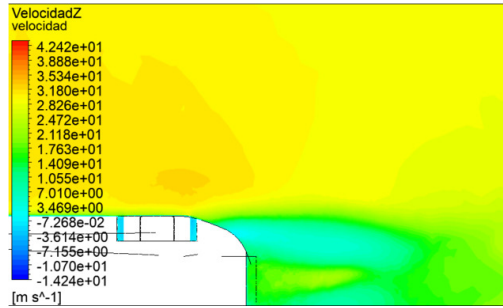
Velocidad [km/h]	Coficiente de arrastre (CD)	Fuerza en eje Z [N]	Coficiente de sustentación (CD)	Fuerza en eje Y [N]
60	0,38506	-69,670	0,13135	23,765
80	0,38495	-123,745	0,13467	43,29167
100	0,38441	193,151	0,13995	70,322
120	0,38359	-277,442	0,13435	97,177



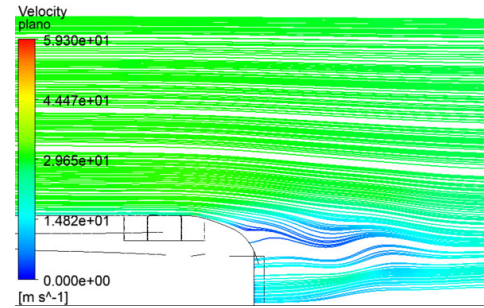
(a) Contorno de velocidad



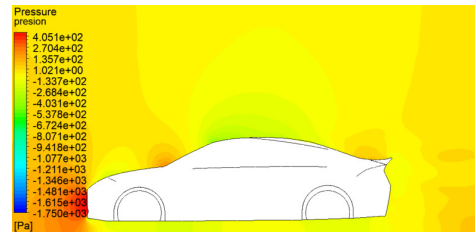
(b) Líneas de flujo



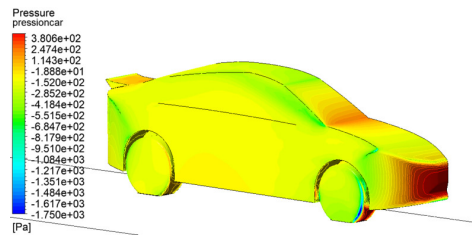
(c) Contorno de velocidad en altura de difusor



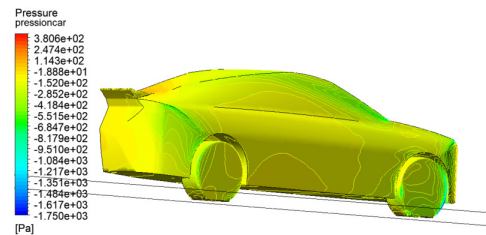
(d) Líneas de flujo en altura de difusor



(e) Contorno de presión



(f) Presión sobre la parte frontal del vehículo



(g) Presión sobre la parte trasera del vehículo

Figura 5.17: Resultados gráficos del vehículo con alerón spoiler a 100 [km/h]

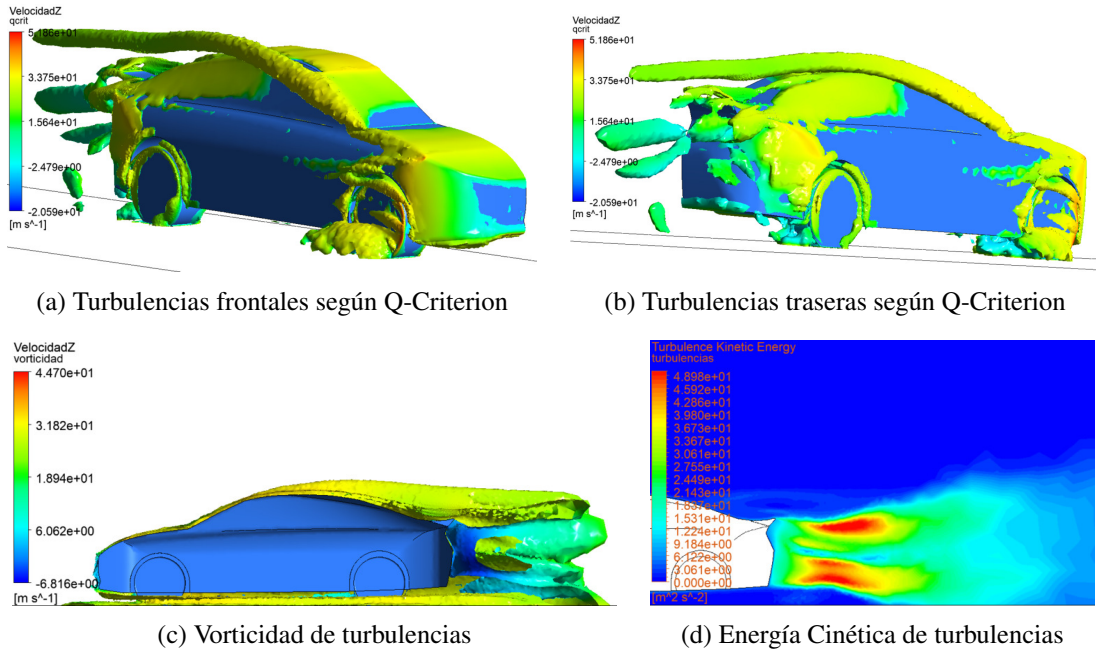


Figura 5.18: Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con alerón spoiler a 100 [km/h]

5.5. Vehículo con alerón alar

La siguiente figura y subsiguiente tabla muestran el mallado y la calidad de este.

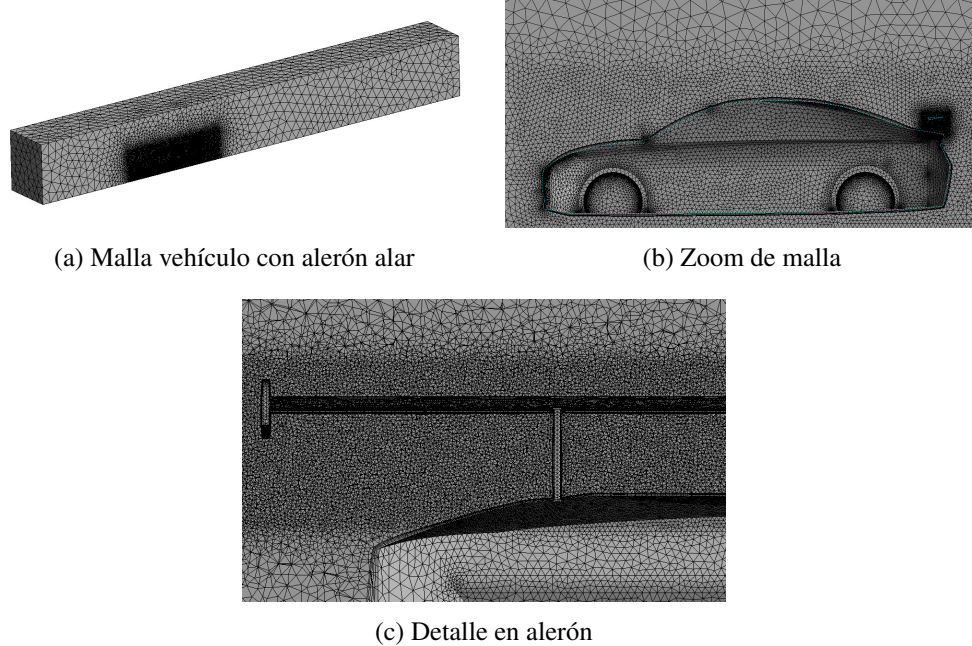


Figura 5.19: Mallado del dominio del vehículo con alerón alar

Tabla 5.9: Métricas de malla en modelo con alerón alar

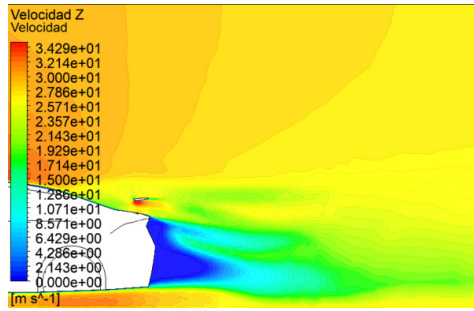
Refinamiento	Inflation	Tamaño de elemento [m]	Calidad ortogonal Mínima	Skewness Máximo	Skewness Promedio	Calidad Mínima	Calidad Promedio	Número de Elementos	Nodos
Alrededor del vehículo y en zona de alerón	5 Capas de crecimiento a 0,8	0,5	$3,77 \cdot 10^{-2}$	0,96227	0,21553	$1,49 \cdot 10^{-2}$	0,78414	3737285	777837

Los resultados numéricos obtenidos durante la simulación son los siguientes:

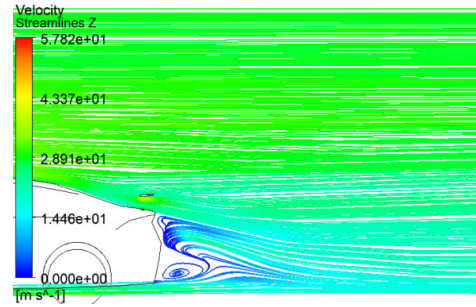
Tabla 5.10: Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con alerón alar

Velocidad [km/h]	Coeficiente de arrastre (CD)	Fuerza en eje Z [N]	Coeficiente de sustentación (CD)	Fuerza en eje Y [N]
60	0,38196	-69,627	0,13588	24,769
80	0,37919	-128,122	0,14816	47,985
100	0,38005	-192,397	0,14889	75,373
120	0,37588	-273,914	0,16057	117,014

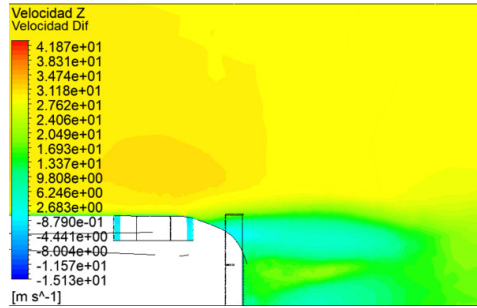
Las interacciones entre el flujo y la carrocería resultantes son:



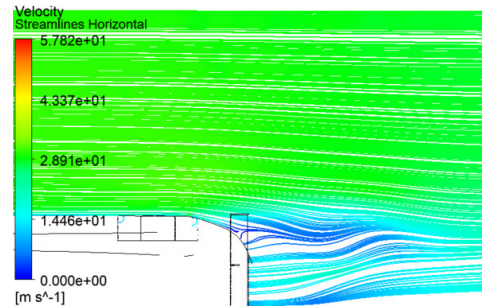
(a) Contorno de velocidad



(b) Líneas de flujo



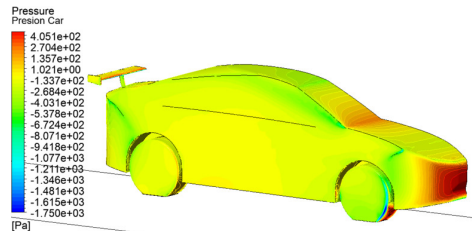
(c) Contorno de velocidad en altura de difusor



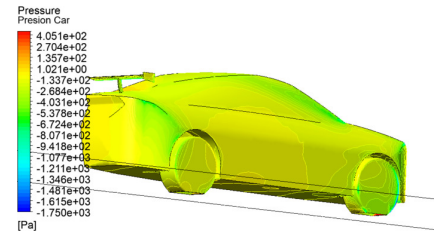
(d) Líneas de flujo en altura de difusor



(e) Contorno de presión

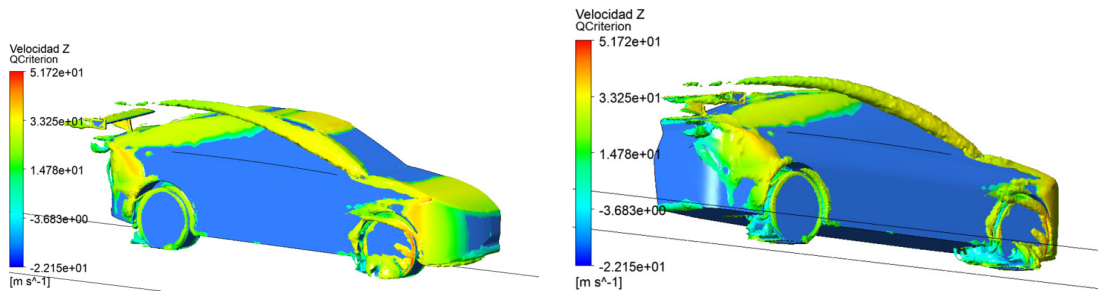


(f) Presión sobre la parte frontal del vehículo



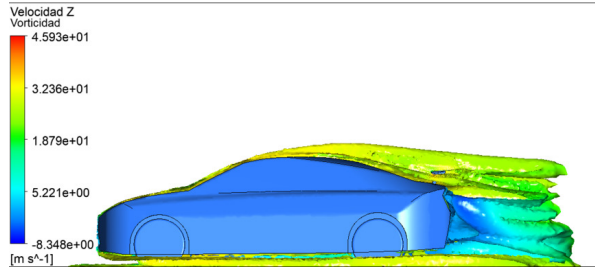
(g) Presión sobre la parte trasera del vehículo

Figura 5.20: Resultados gráficos del vehículo con alerón alar a 100 [km/h]

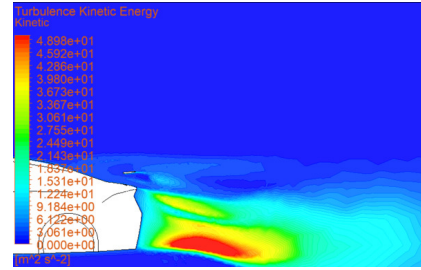


(a) Turbulencias frontales según Q-Criterion

(b) Turbulencias traseras según Q-Criterion



(c) Vorticidad de turbulencias

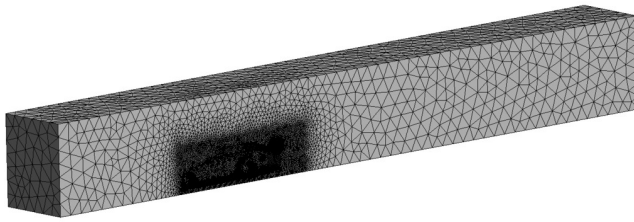


(d) Energía Cinética de turbulencias

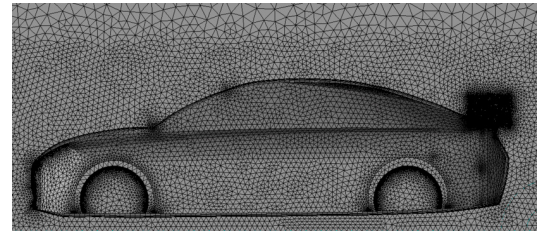
Figura 5.21: Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con alerón alar a 100 [km/h]

5.6. Vehículo con alerón spoiler y difusor recto

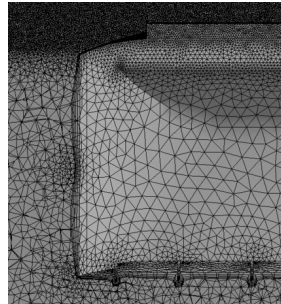
A continuación se presenta la malla utilizada y los criterios de calidad de esta.



(a) Malla vehículo con alerón spoiler y difusor recto



(b) Zoom de malla



(c) Malla en parte trasera

Figura 5.22: Mallado del dominio del vehículo con alerón spoiler y difusor recto

Tabla 5.11: Métricas de malla del modelo con alerón spoiler y difusor recto

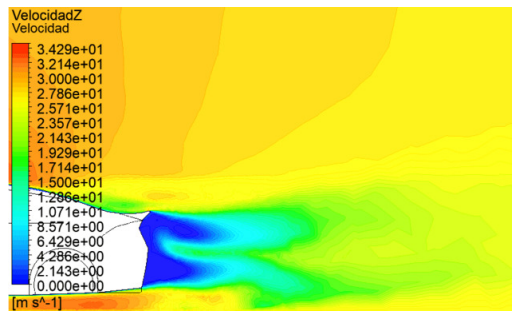
Refinamiento	Inflation	Tamaño de elemento [m]	Calidad ortogonal Mínima	Skewness Máximo	Skewness Promedio	Calidad Mínima	Calidad Promedio	Número de Elementos	Nodos
Alrededor del vehículo y en zona de alerón	5 Capas de crecimiento a 0,8	0,5	$4,15 \cdot 10^{-2}$	0,95846	0,21026	$1,17 \cdot 10^{-2}$	0,80242	4444147	881515

Producto de la simulación se llegan a los siguientes resultados numéricos.

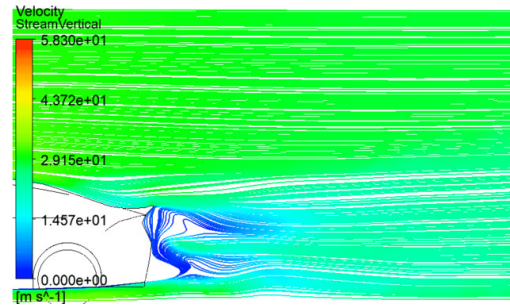
Tabla 5.12: Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con alerón spoiler y difusor recto

Velocidad [km/h]	Coficiente de arrastre (CD)	Fuerza en eje Z [N]	Coficiente de sustentación (CD)	Fuerza en eje Y [N]
60	0,38921	-70,421	0,10283	18,605
80	0,38864	-124,932	0,11110	35,713
100	0,38943	-195,674	0,10154	51,019
120	0,38778	-280,473	0,11812	85,435

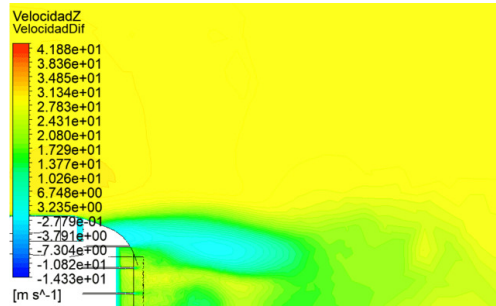
Asimismo, se tienen los resultados del comportamiento del aire.



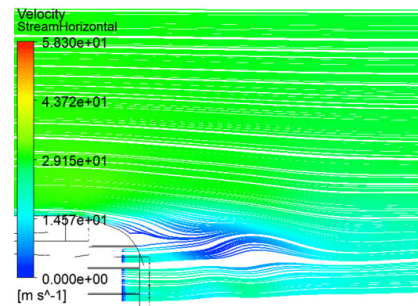
(a) Contorno de velocidad



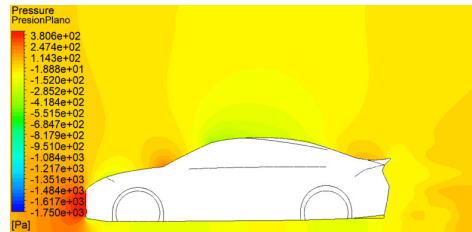
(b) Líneas de flujo



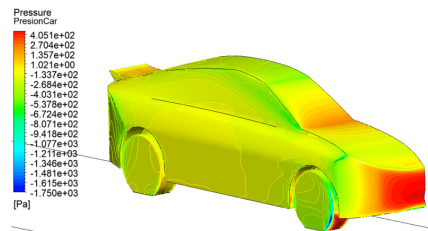
(c) Contorno de velocidad en altura de difusor



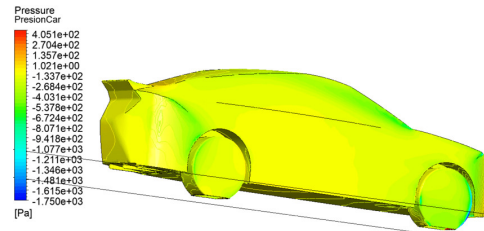
(d) Líneas de flujo en altura de difusor



(e) Contorno de presión



(f) Presión sobre la parte frontal del vehículo



(g) Presión sobre la parte trasera del vehículo

Figura 5.23: Resultados gráficos del vehículo con alerón spoiler y difusor recto a 100 [km/h]

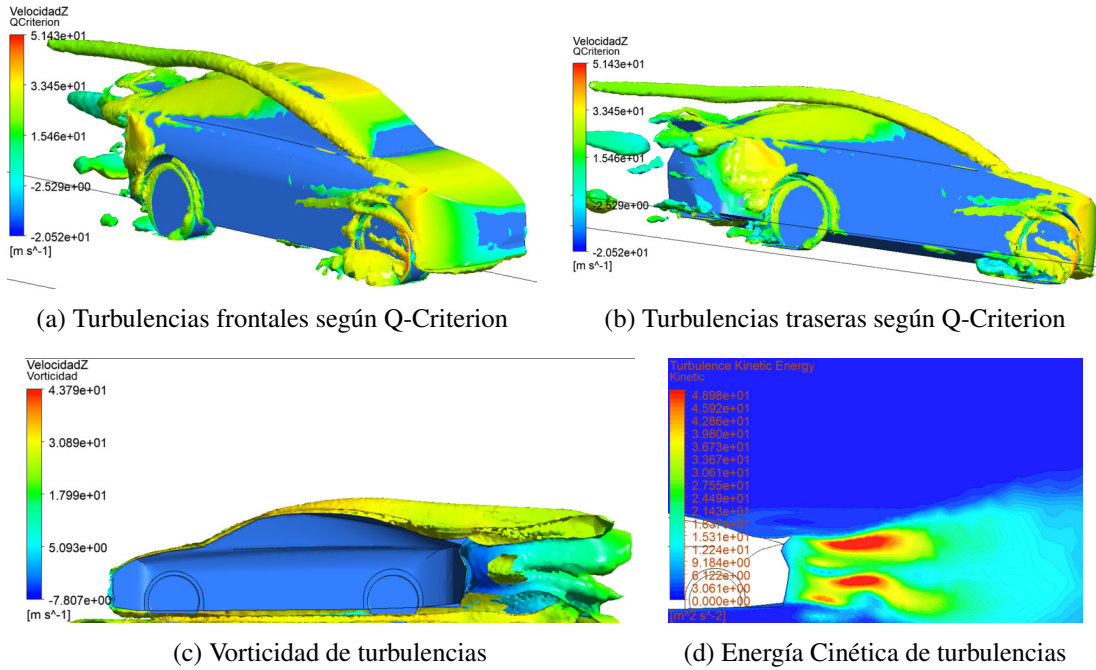
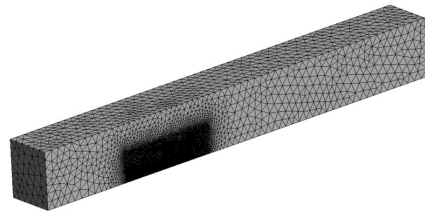


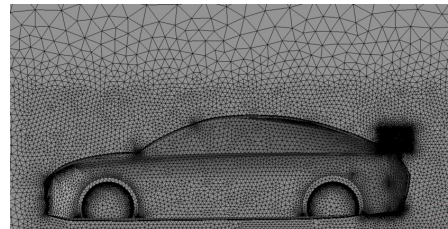
Figura 5.24: Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con alerón spoiler y difusor recto a 100 [km/h]

5.7. Vehículo con alerón spoiler y difusor curvo

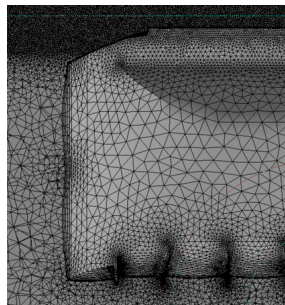
La malla de este caso se expone en las siguientes figuras.



(a) Malla vehículo con alerón spoiler y difusor curvo



(b) Zoom de malla



(c) Malla en parte trasera

Figura 5.25: Mallado del dominio del vehículo con alerón spoiler y difusor curvo

Mientras a continuación se tienen las métricas de calidad.

Tabla 5.13: Métricas de malla del modelo con alerón spoiler y difusor curvo

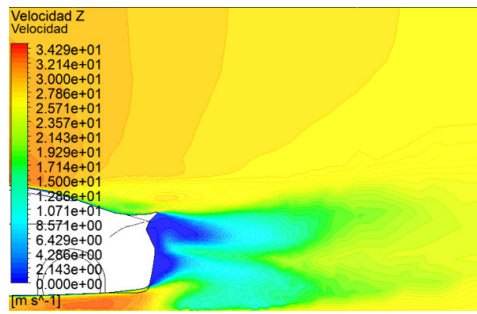
Refinamiento	Inflation	Tamaño de elemento [m]	Calidad ortogonal Mínima	Skewness Máximo	Skewness Promedio	Calidad Mínima	Calidad Promedio	Número de Elementos	Nodos
Alrededor del vehículo y en zona de alerón	5 Capas de crecimiento a 0,8	0,5	$4,16 \cdot 10^{-2}$	0,95841	0,21262	$1,65 \cdot 10^{-2}$	0,79605	4612703	930177

La simulación resultante permite obtener las siguientes fuerzas y coeficientes sobre el modelo:

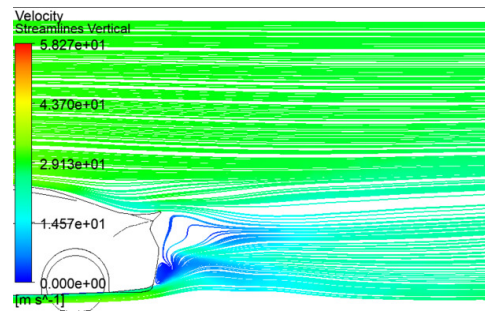
Tabla 5.14: Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con alerón spoiler y difusor curvo

Velocidad [km/h]	Coefficiente de arrastre (CD)	Fuerza en eje Z [N]	Coefficiente de sustentación (CD)	Fuerza en eje Y [N]
60	0,39574	-71,600	0,07692	13,917
80	0,39526	-127,061	0,08121	26,105
100	0,39390	-197,918	0,06634	33,333
120	0,39278	-284,090	0,06902	49,918

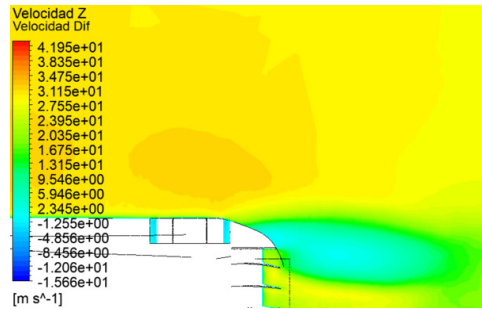
La representación de la interacción con el flujo se expone en las figuras a continuación:



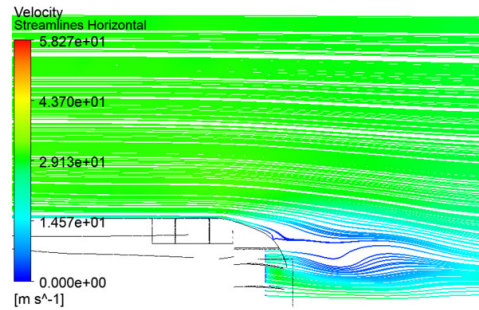
(a) Contorno de velocidad



(b) Líneas de flujo



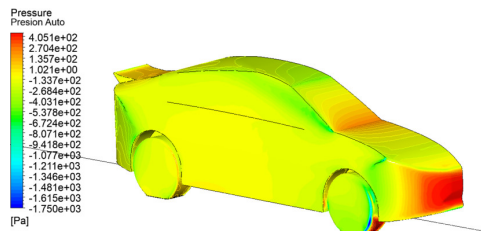
(c) Contorno de velocidad en altura de difusor



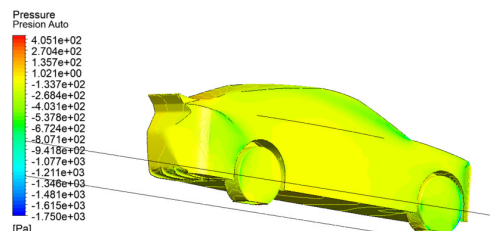
(d) Líneas de flujo en altura de difusor



(e) Contorno de presión



(f) Presión sobre la parte frontal del vehículo



(g) Presión sobre la parte trasera del vehículo

Figura 5.26: Resultados gráficos del vehículo con alerón spoiler y difusor curvo a 100 [km/h]

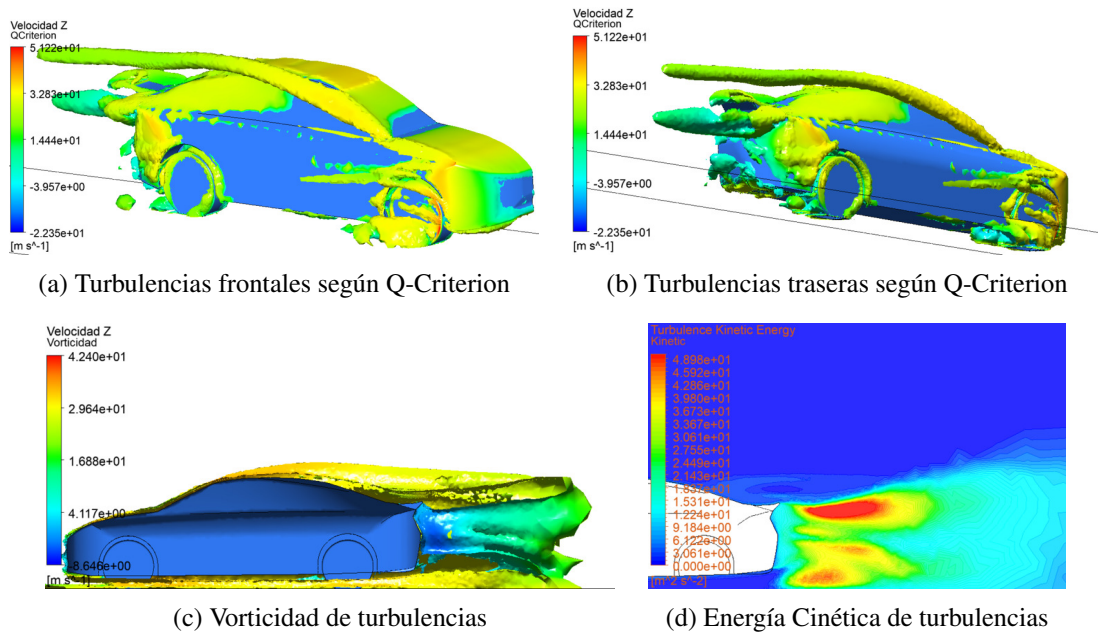
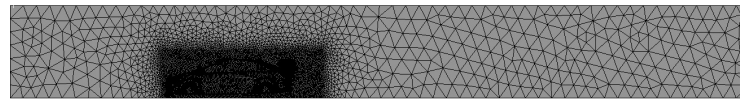


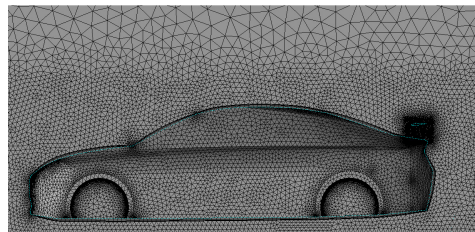
Figura 5.27: Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con alerón spoiler y difusor curvo a 100 [km/h]

5.8. Vehículo con alerón alar y difusor recto

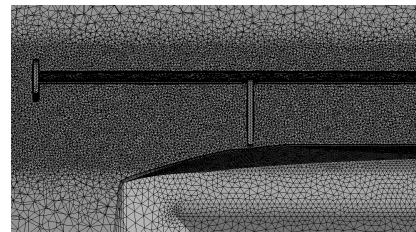
La respectiva malla y los parámetros de calidad de malla de este caso son incluidos a continuación.



(a) Malla vehículo con alerón alar y difusor recto



(b) Zoom de malla



(c) Detalle en alerón

Figura 5.28: Mallado del dominio del vehículo con alerón alar y difusor recto

Tabla 5.15: Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con alerón alar y difusor recto

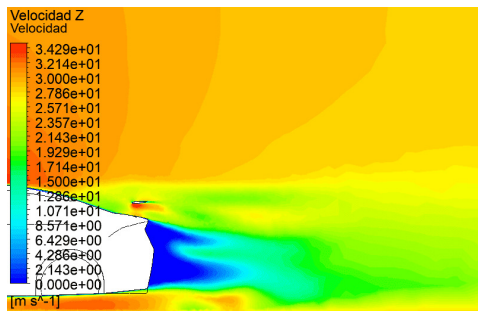
Velocidad [km/h]	Coefficiente de arrastre (CD)	Fuerza en eje Z [N]	Coefficiente de sustentación (CD)	Fuerza en eje Y [N]
60	0,38071	-69,401	0,11492	20,950
80	0,37615	121,829	0,11439	37,049
100	0,37591	-190,304	0,10600	53,663
120	0,37555	-273,672	0,11449	83,432

Los resultados de las simulaciones incluyen las fuerzas y coeficientes siguientes:

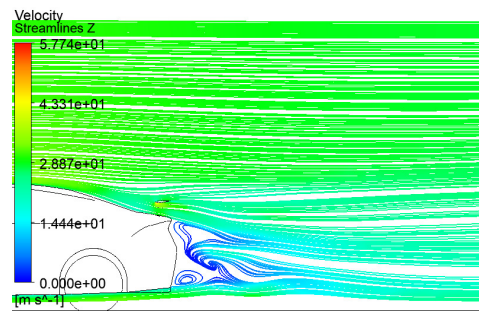
Tabla 5.16: Métricas de malla del modelo con alerón alar y difusor recto

Refinamiento	Inflation	Tamaño de elemento [m]	Calidad ortogonal Mínima	Skewness Máximo	Skewness Promedio	Calidad Mínima	Calidad Promedio	Número de Elementos	Nodos
Alrededor del vehículo y en zona de alerón	5 Capas de crecimiento a 0,8	0,5	$4,14 \cdot 10^{-2}$	0,95862	0,21624	$1,30 \cdot 10^{-2}$	0,78335	3770485	785821

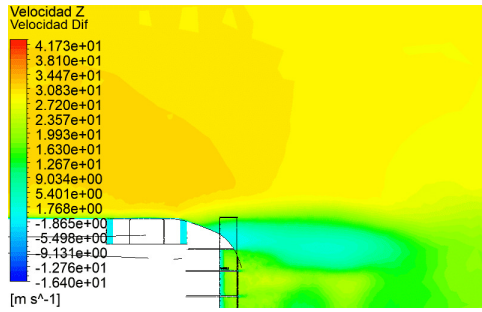
A continuación se tienen los resultados gráficos:



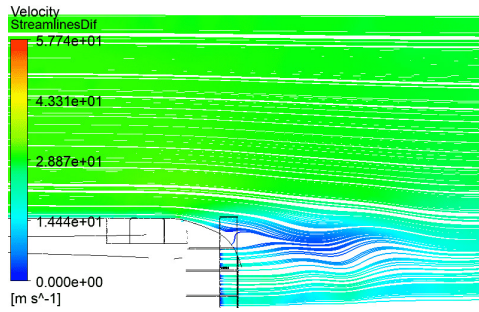
(a) Contorno de velocidad



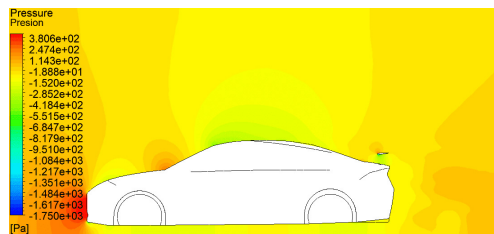
(b) Líneas de flujo



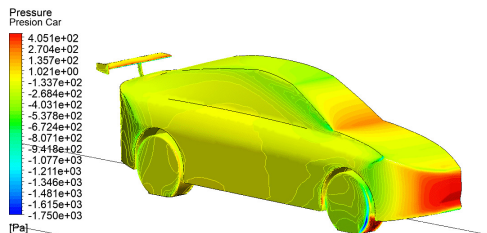
(c) Contorno de velocidad en altura de difusor



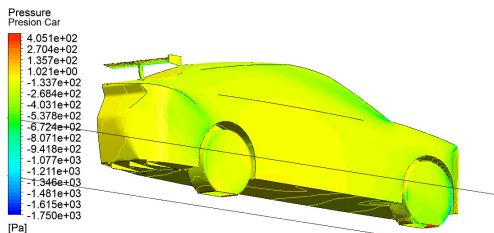
(d) Líneas de flujo en altura de difusor



(e) Contorno de presión



(f) Presión sobre la parte frontal del vehículo



(g) Presión sobre la parte trasera del vehículo

Figura 5.29: Resultados gráficos del vehículo con alerón alar y difusor recto a 100 [km/h]

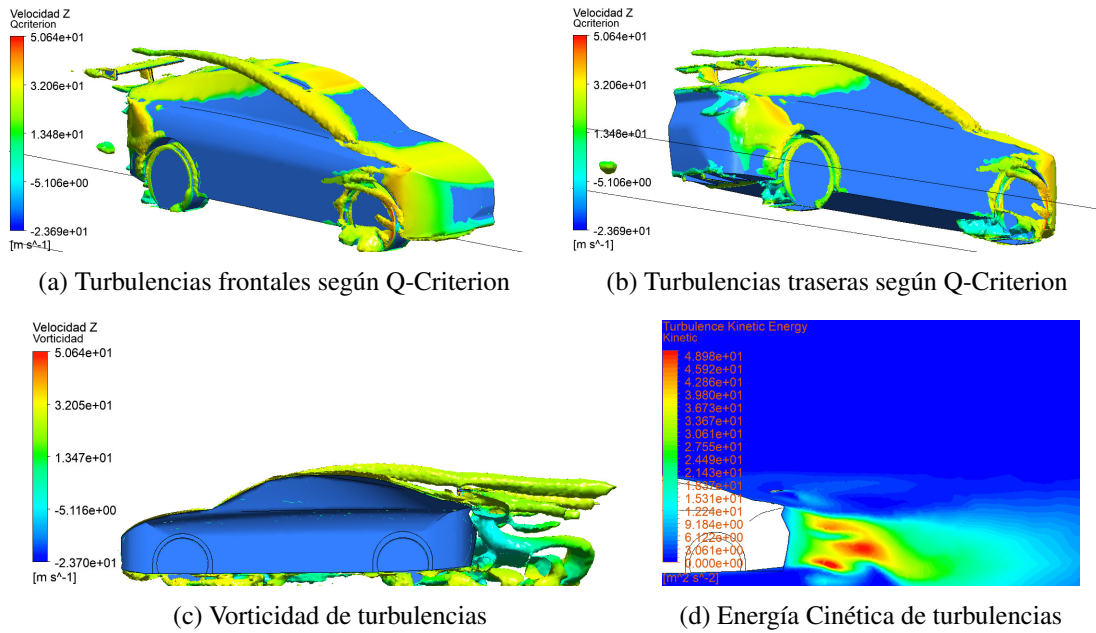
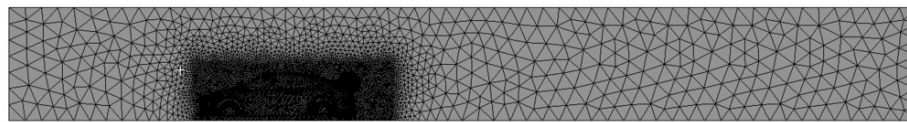


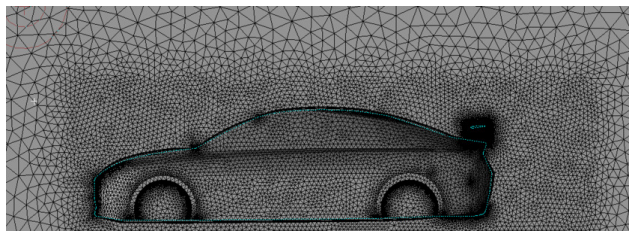
Figura 5.30: Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con alerón alar y difusor recto a 100 [km/h]

5.9. Vehículo con alerón alar y difusor curvo

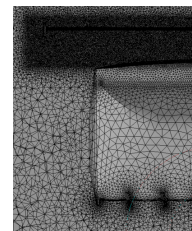
La malla del dominio en este modelo y los parámetros de calidad son:



(a) Malla vehículo con alerón alar y difusor curvo



(b) Zoom de malla



(c) Detalle en difusor

Figura 5.31: Mallado del dominio del vehículo con alerón alar y difusor curvo

Tabla 5.17: Métricas de malla del modelo con alerón alar y difusor curvo

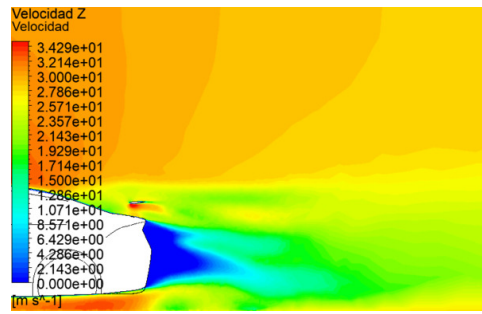
Refinamiento	Inflation	Tamaño de elemento [m]	Calidad ortogonal Mínima	Skewness Máximo	Skewness Promedio	Calidad Mínima	Calidad Promedio	Número de Elementos	Nodos
Alrededor del vehículo y en zona de alerón	5 Capas de crecimiento a 0,8	0,5	$3,93 \cdot 10^{-2}$	0,96066	0,21847	$1,26 \cdot 10^{-2}$	0,77676	3941219	835203

Los resultados numéricos de fuerzas y coeficientes se exponen en la siguiente tabla:

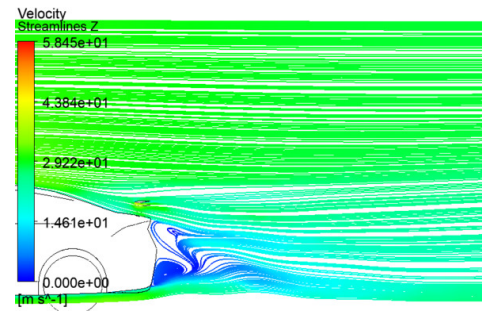
Tabla 5.18: Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo con alerón alar y difusor curvo

Velocidad [km/h]	Coefficiente de arrastre (CD)	Fuerza en eje Z [N]	Coefficiente de sustentación (CD)	Fuerza en eje Y [N]
60	0,36935	-67,330	0,09912	18,069
80	0,36716	-118,914	0,09417	30,500
100	0,36518	-184,869	0,09768	49,449
120	0,36469	-265,760	0,11319	82,484

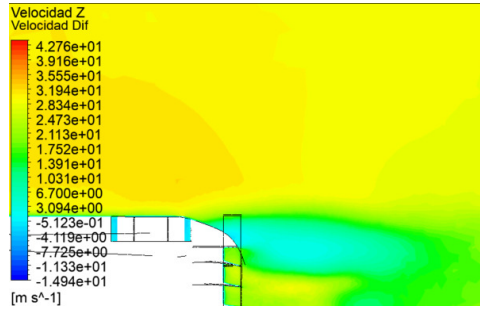
A continuación se presentan gráficamente las interacciones con el flujo de aire.



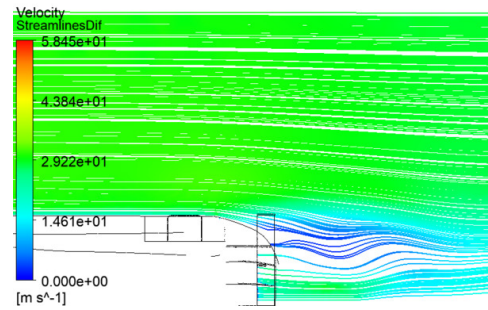
(a) Contorno de velocidad



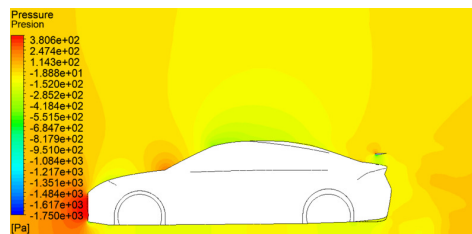
(b) Líneas de flujo



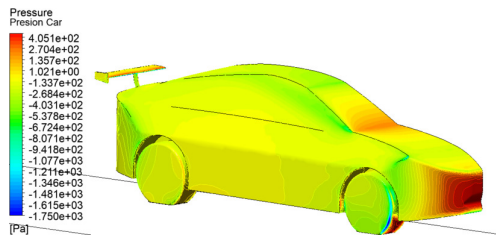
(c) Contorno de velocidad en altura de difusor



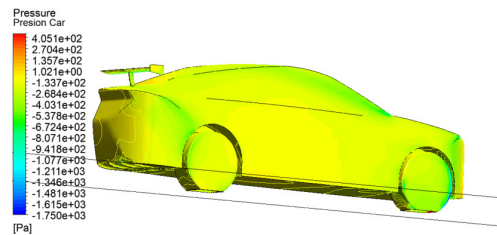
(d) Líneas de flujo en altura de difusor



(e) Contorno de presión

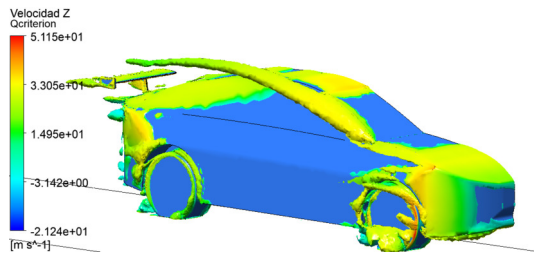


(f) Presión sobre la parte frontal del vehículo

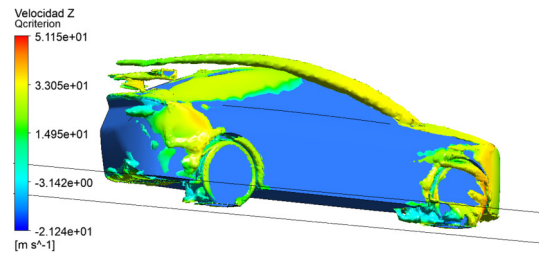


(g) Presión sobre la parte trasera del vehículo

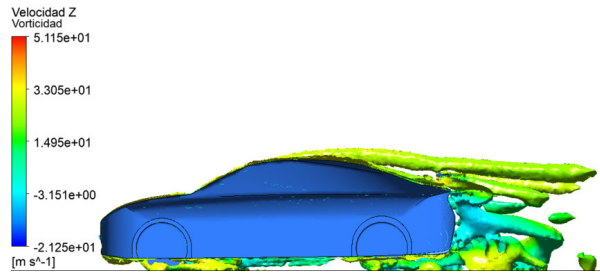
Figura 5.32: Resultados gráficos del vehículo con alerón alar y difusor curvo a 100 [km/h]



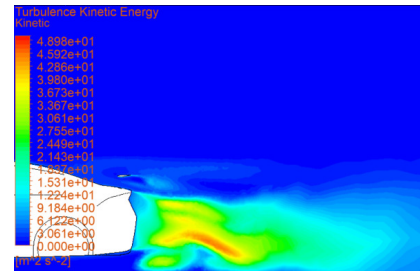
(a) Turbulencias frontales según Q-Criterion



(b) Turbulencias traseras según Q-Criterion



(c) Vorticidad de turbulencias



(d) Energía Cinética de turbulencias

Figura 5.33: Resultados gráficos de turbulencias en vehículo con alerón alar y difusor curvo a 100 [km/h]

Capítulo 6

Análisis de resultados

Para una mejor comprensión de los resultados, se lleva a cabo un análisis separado, comenzando desde el efecto que las modificaciones tienen por si solas sobre el comportamiento del aire, mediante los resultados numéricos generados. Se da un énfasis en los coeficientes de arrastre y las fuerzas verticales sobre el vehículo debido a su facilidad para comparación, utilizando además los resultados gráficos para explicar de donde estos provienen. Luego se procede a repetir el proceso pero considerando la combinación de las modificaciones, analizando como los efectos individuales se contrarrestan o compensan al actuar en conjunto.

6.1. Vehículo Base

Como se observa en la tabla de resultados 5.2, la carrocería del vehículo presenta un comportamiento aerodinámico regular respecto a la fuerzas de arrastre generadas en función de la velocidad, lo que se aprecia con un coeficiente de arrastre entre 0,35 y 0,34 que disminuye a medida que aumenta la velocidad, siendo un comportamiento que se repite en el resto de casos, aunque es importante notar que al no ser una reproducción exacta del modelo real se tiene una diferencia respecto al coeficiente de arrastre especificado se encuentra entre 0,28 y 0,31 dependiendo del nivel de equipamiento.

En cuanto a los valores, la conducta del coeficiente de arrastre frente a la velocidad ha sido observada en simulaciones automotrices mediante CFD como en los estudios de R. Chandra [16], P. Carbonell [6] y C. Fred quién estudio el efecto del número de Reynolds y la capa límite sobre el coeficiente [21], teniendo un punto de estancamiento de los valores a Reynolds de alta magnitud para su caso.

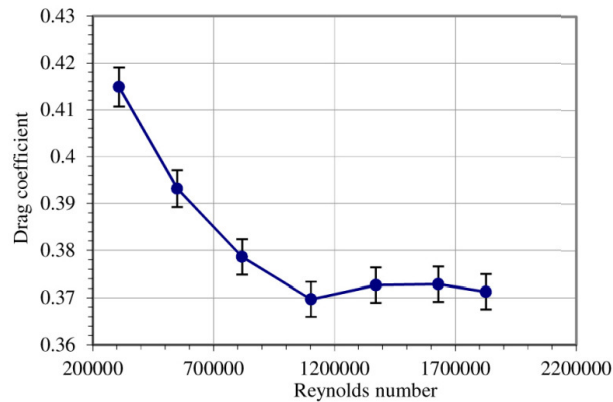


Figura 6.1: Coeficiente de arrastre y número de Reynolds [21]

En cuanto a los resultados gráficos que explican las fuerzas horizontales, como se observa en los contornos de velocidad de la figura 5.2, se tiene una zona de aguas muertas de forma triangular, representada por el contorno azul en la parte trasera del vehículo, la cual no presenta mayores variaciones al aumentar la velocidad. Esta zona es una de las principales contribuciones a la fuerza de arrastre, lo que se manifiesta en las diferencias de presión entre la parte delantera y trasera de los contornos de presión de las figuras 5.3 y 5.4. Adicionalmente, se observa una zona de baja velocidad en la estela a la altura del techo.

Observando las turbulencias y los diferentes criterios en las figuras 5.8 y 5.9, se aprecia que estas no están generadas por un elemento en particular, fuera de aquellas generadas con el abrupto choque del aire con la geometría estática de las ruedas, sino que son producto de la interacción con la carrocería completa. Aunque según lo mencionado por A. Guerrero [15] y A. Huminic [20], estas turbulencias no son menos importantes ya que contribuyen al incremento de las fuerzas de arrastre y de sustentación, en concreto con aquellas generadas en las ruedas traseras ya que debido a su ubicación interactúan de manera negativa con las turbulencias traseras.

Pasando a las concentraciones de energía cinética de la figura 5.9, existen turbulencias en la parte trasera de mayor energía cinética turbulenta, debido a que la zona de vacío resultante de la zona de aguas muertas fomenta la mezcla del flujo y la formación de remolinos pequeños cuya gran variación de movimiento direccional y rotacional genera estos valores.

Respecto a las líneas de flujo de las figuras 5.5 y 5.6, se tienen las zonas de recirculación del aire en la parte trasera y también se ilustra como hay cierto grado de desordenamiento menor en el aire a la altura del difusor, pero el flujo pasa en la mayor parte ininterrumpido por debajo del automóvil.

En cuanto a las fuerzas, el vehículo se ve afectado considerablemente por fuerzas verticales aumentando de 60 [N] a 60 [km/h] a alrededor de 220 [N] a la mayor velocidad, lo que puede generar importantes desventajas respecto a control y frenado en un escenario real [11].

Como era de esperarse, la geometría del vehículo genera mayor velocidad en la parte superior del vehículo, lo que significa una diferencia en los contornos de presión relativa (vista en la figura 5.2) que resulta en las fuerzas verticales mencionadas, pero como se aprecia, existen unas pequeñas zonas de presión en el inicio del parabrisas y en el maletero, cuya mayor presión genera fuerzas descendentes. Sumado a esto, la gran concentración de presión en la parte frontal debido a la geo-

metría sólida del vehículo puede explicar las diferencias respecto al valor del coeficiente de arrastre real ya que el modelo real presenta mallas de ventilación en esta zona.

6.2. Efecto de los dispositivos

6.2.1. Difusor recto

Tomando los resultados numéricos de la tabla 5.4, la implementación de un difusor recto genera una disminución del coeficiente de arrastre, pero esta es solo de entre 0,1 % y 0,2 % a excepción del caso a 80 [km/h] donde se aprecia una disminución de un 0,9 %.

Se presentan diferencias en los resultados gráficos expuestos en la figura 5.11, donde se observa una zona de aguas muertas más pequeña respecto al vehículo base según el contorno de velocidad y la líneas de flujo, además de una mejora en el ordenamiento del flujo en la altura del difusor.

No hay una mayor modificación de las turbulencias según los resultados gráficos de la figura 5.12, donde sólo se observa una menor cantidad de turbulencias en la parte anterior superior que han sido relocalizadas en el difusor. De igual manera se tiene una pequeña disminución de la zona de turbulencias gracias a la disminución de la zona de aguas muertas.

Este dispositivo también generó una disminución de las fuerzas verticales sobre el vehículo hasta 100 [km/h], donde luego presenta un efecto negativo de un incremento sobre las fuerzas. Revisando los contornos de presión relativa de este caso en la figura 5.11, resulta difícil apreciar una gran diferencia salvo en una pequeña zona con mayor presión a la salida del difusor evidenciado por la concentración de color.

Inicialmente estos resultados difieren de aquellos presentes en trabajos de estudio sobre difusores, no en su efecto sino en su magnitud, donde se registra una menor disminución del coeficiente de arrastre al ángulo seleccionado, Zhang en [18] y Senthilkuma en [19]. Esto puede originarse dada la geometría simplificada del vehículo, como se menciona en la sección del caso base, ya que el flujo del aire no se ve perturbado de manera considerable al entrar en la parte inferior del vehículo.

Un vehículo real tiene elementos mecánicos que interrumpen el flujo y generan turbulencias con cambios de velocidad, por esto, se hace un caso más con un modelo más complejo al incorporar elementos que simulan ciertos componentes del sistema motriz, inspirado en un modelo como el utilizado por Guerrero en su estudio sobre aerodinámica [15].

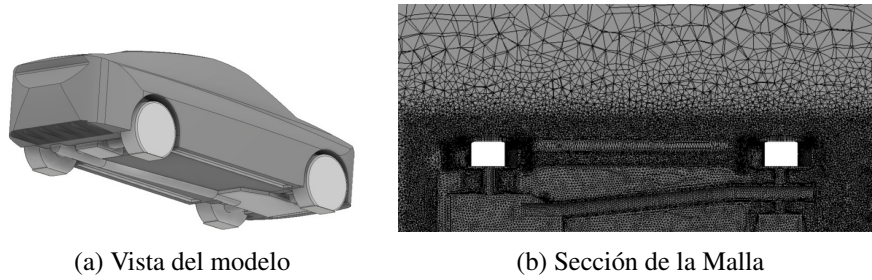


Figura 6.2: Modelo y mallado del dominio del vehículo con elementos mecánicos y difusor recto

En este estudio extra, extendido en el Anexo E.3, se aprecia como la incorporación de geometrías en la parte inferior tiene un efecto sobre el flujo del aire. Se tiene un perfil de velocidad menos uniforme en la parte inferior al observar el contorno de velocidad, a su vez, generando gradientes de presión en la parte inferior además de la generación de diferentes elementos turbulentos, aunque siempre contando con un gran incremento de la complejidad de la malla con alrededor de 9 millones de nodos.

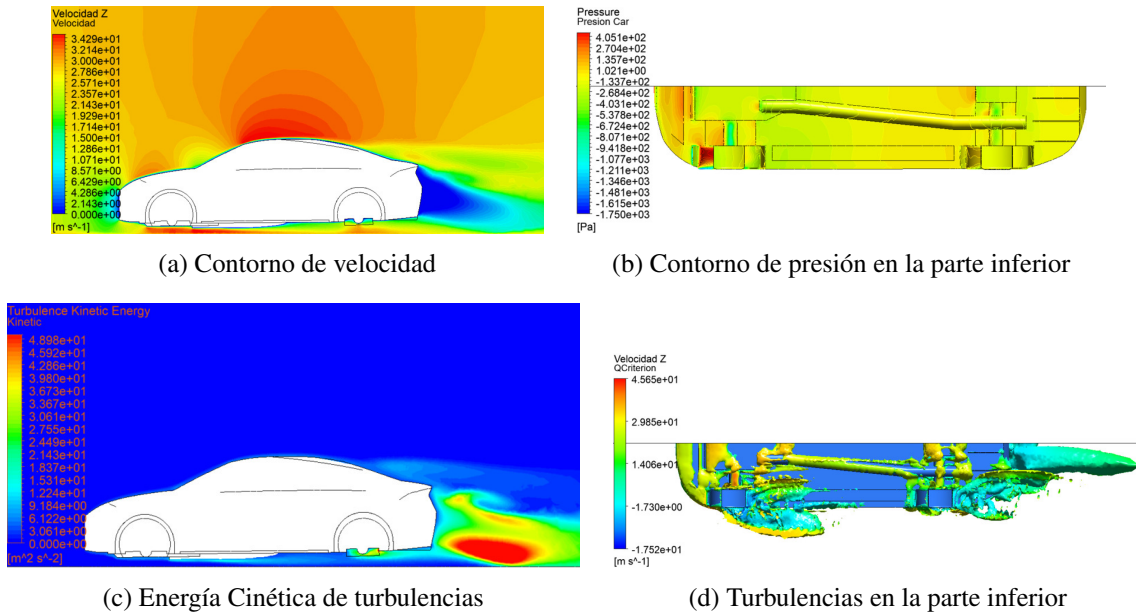


Figura 6.3: Resultados gráficos del vehículo con difusor recto y elementos mecánicos a 100 [km/h]

6.2.2. Difusor curvo

En el caso del modelo con difusor curvo se tiene una disminución de la fuerza vertical en promedio de un 15 % sobre el vehículo, frente de un aumento con una media de un 4,5 % en el coeficiente de arrastre. Esto es esperado ya que como su homólogo utilizado en F1, el objetivo de este tipo de difusores es generar fuerzas que adhieran el vehículo al pavimento.

Analizando los resultados gráficos de la figura 5.14, se observa como la implementación de un difusor curvo genera una mejor zona de transición en la parte trasera, menor en comparación al caso del difusor recto, evidenciada por la reducción de la zona de aguas muertas y en parte por las líneas de flujos, aunque a la altura del difusor se aprecia una zona desordenada en el flujo tras las

ruedas. Se presenta una zona a poca altura respecto al pavimento donde ocurre una transición de velocidad antes que en el caso base gracias a la abertura del difusor.

Sin embargo, en cuanto a la forma de las turbulencias de la figura 5.15, se aprecia un comportamiento similar al caso del difusor recto respecto a la forma de estas, pero con un incremento en la magnitud de la energía cinética evidenciado por la densidad de los colores, además prestando atención a la zona se tiene un incremento debido a la anticipada transición del aire bajo el vehículo.

El aumento de la energía de estas turbulencias en conjunto al aire impactando las aletas curvas explica como pese a tener un flujo más ordenado y una mejor zona de transición se produce un aumento del coeficiente de arrastre.

Los contornos de presión varían respecto al aumento de fuerzas verticales, generando una leve disminución de la presión bajo el vehículo, acortando el área de presión media sobre el cuerpo del automóvil.

6.2.3. Alerón spoiler

Este modelo genera un efecto claro según los resultados de la tabla 5.8: una considerable disminución de las fuerzas de sustentación sobre el vehículo con una reducción en promedio de un 58 % entre las velocidades estudiadas, aunque con su respectivo aumento sobre las fuerzas de arrastre.

Utilizando los contornos de presión de la figura 5.17, se visualiza como se genera una zona de aumento de la presión sobre la parte posterior gracias al alerón spoiler, lo que genera las fuerzas mencionadas.

Por el otro lado, la instalación de un alerón tiene su efecto en el aumento de las fuerzas de arrastre principalmente debido a la altura y extensión de este, con un considerable aumento de un 10 % a 60 [km/h] a un 12,6 % a la velocidad máxima.

Observando el contorno de velocidad y las líneas de flujo tras el vehículo, es evidente como se expande la zona de estela y se genera una separación del flujo debido a la geometría. Sumado a esto se evidencia la presencia de mayores turbulencias una vez que el aire se mueve en la parte trasera según las imágenes de la figura 5.18, aumentando tanto su concentración como magnitud detrás del alerón.

Mientras los resultados numéricos producto de la simulación son bien respaldados por el comportamiento del fluido frente a la geometría, el diseño de este alerón tiene mayores dimensiones que los alerones spoiler generalmente instalados en vehículos, lo que resulta en un dispositivo más intrusivo, difiriendo de resultados existentes como los estudios en 2 dimensiones de D. Laha [4].

6.2.4. Alerón Alar (Wing)

Siendo un perfil alar inverso, este alerón genera fuerzas en la vertical sobre sí mismo, lo que adhiere el vehículo al piso con una disminución de 60 [N] a 23,7 [N] a 60 [km/h] para subir gradualmente hasta 117 [N] a 120 [km/h], representando una disminución promedio del 53 %.

El efecto de esta geometría se presenta claramente al observar los contornos de velocidad y presión de los resultados gráficos de la figura 5.20, donde se tiene como el flujo del aire se acelera en la parte inferior del perfil lo que resulta en las diferencias de presión entre la mayor en la parte superior y la inferior, destacando la reducción de la dimensión longitudinal de la zona de presión media-baja por sobre el techo del vehículo.

Respecto a la zona de nula velocidad en la parte posterior del vehículo, en el mismo contorno de velocidad se aprecia como este se extiende ligeramente en comparación al vehículo base, mientras que por otro lado no hay mayor alteración en las líneas de flujo salvo la extensión mencionada.

Este último punto se suma a las turbulencias que se aprecian en la figura 5.21, las cuales se generan en la superficie y alrededor del alerón. Existe además una nueva zona en la parte trasera donde existe una mayor intensidad de turbulencias.

Uniendo estos dos últimos puntos, se explica como la interacción flujo-vehículo genera un aumento notable de las fuerzas de arrastre lo que se manifiesta en coeficientes de arrastre en promedio un 9,9 % por sobre los valores del vehículo base.

Considerando una comparación al alerón spoiler, los resultados indican que el alerón alar utilizado en este estudio no es tan intrusivo sobre el flujo gracias a su perfil y su bajo grado de inclinación, evidenciable al observar las líneas de flujo de la figura 5.20.

6.3. Efecto e interacción de múltiples dispositivos

6.3.1. Alerón spoiler y difusor recto

La implementación de ambas modificaciones genera un alza de las fuerzas de arrastre y por ende también un incremento en el coeficiente de arrastre de un promedio de 12,67 % en las velocidades establecidas. Mientras que respecto a las fuerzas verticales, la combinación disminuye en gran medida estas fuerzas con una disminución promedio de 66,5 %.

Esta interacción parece inicialmente contradictoria debido a que como se observa en la tabla 5.4 y se trató previamente, un difusor recto disminuye el coeficiente de arrastre por lo que se esperaba que este contrarrestara los efectos generados por el alerón spoiler. Explorando el comportamiento del flujo expuesto en la figura de contornos 5.23, se contempla como al comparar con el caso con solo el alerón spoiler existe una pequeña diferencia respecto a la zona de aguas muertas en el flujo cercano al borde inferior, pero si se produce una notoria separación del flujo respecto a la parte posterior y extensión de la zona de recirculación, teniendo así una mayor zona de vacío y explicando estos resultados.

Respecto a turbulencias, no se tiene una notable diferencia respecto a la forma si se considera el Q-Criterion de este caso en la figura 5.24, pero prestando atención a la imagen correspondiente a la energía cinética, se percibe la interacción entre estos componentes: se genera una estela turbulenta debido al alerón mientras se reduce la zona inferior de turbulencias debido al difusor recto.

A su vez, al aumentar en ambos dispositivos la distribución de presión sobre el vehículo, se ob-

tiene como resultado una menor fuerza de sustentación sobre el vehículo en comparación con cada dispositivo por separado, respaldado por los contornos de presión de la figura 5.24 y el incremento sobre la zona del alerón expuesto.

6.3.2. Alerón spoiler y difusor curvo

Esta combinación resulta en el caso con la menor fuerza de sustentación entre todos los casos, con bajos valores de 14, 26, 33 y 50 [N] a 60, 80, 100 y 120 [km/h] respectivamente, lo equivalente a una reducción promedio de un 77,4%. Aunque también como consecuencia de la inclusión de ambos apéndices, se incrementa sustancialmente el coeficiente de arrastre, con un aumento promedio de un 14,31%, siendo mayor que el efecto de cada uno de los apéndices.

Se obtiene un resultado esperado, considerando que son 2 modificaciones cuyo efecto es generar fuerzas en el eje vertical negativo sobre un automóvil, siendo cada una aquella con el mayor efecto sobre estas fuerzas en comparación al resto alerones y difusores respectivamente.

Pasando al análisis de los resultados gráficos, observando los contornos de velocidad de la figura 5.26, se visualiza una disminución del área de velocidad nula pero también se extiende la zona de transición al aire próximo al pavimento. Acompañando a esto se observa como el flujo en la altura del difusor sale más ordenado, pero la zona de separación de flujo ya existente en el caso con el alerón spoiler por si solo permanece en este caso.

Más contribuciones a la fuerza de arrastre provienen de las turbulencias apreciables en la figura 5.27, donde al observar el Q-Criterion se observa que existe una mayor concentración de turbulencias tanto comparando al caso base, como a la instalación de ambos dispositivos por separados. Considerando en la misma figura la vorticidad y la energía cinética de las turbulencias, se evidencia una mayor magnitud de ambos parámetros en la parte trasera en la altura del alerón además de una zona mayor energía de turbulencia inferior debido a la mayor área de transición mencionado en el párrafo anterior.

Utilizando los contornos de presión de la figura 5.26, se observa que la zona de alta presión sobre el alerón spoiler es amplificada tanto en envergadura como magnitud, en cierto grado por la inclusión del difusor en comparación al caso del spoiler por separado. De la misma manera, se suman para un decremento leve pero no menos significativo en la zona de baja presión que existe sobre la parte frontal y una mayor magnitud en la zona de alta presión en el parabrisas.

6.3.3. Alerón alar (Wing) y difusor recto

La interacción de los efectos de un difusor recto sobre aquellos del alerón alar hacen que este caso entregue un vehículo menos afectado por fuerzas verticales a la vez que se disminuye el efecto de las fuerzas de arrastre. Comparando los resultados de la tabla 5.15, se tiene una reducción de la fuerza neta de sustentación promedio de un 65% respecto al caso base, notando que los casos del alerón alar y difusor por si solos generan una disminución menor de un 53,7% y 4,4% en promedio respectivamente. Pero en cuanto al coeficiente de arrastre, la relación entre ambas modificaciones genera resultados ubicados en un punto medio entre las fuerzas por cada dispositivo por sí mismo, donde el uso de un difusor disminuye el aumento del coeficiente de arrastre del alerón por si solo de un 9,9% a un 9,28% en conjunto, notando una contribución positiva respecto a este parámetro.

Si se compara los contornos de velocidad y las líneas de flujo de esta permutación en la figura 5.29, con aquellos del caso con solo el alerón, se tiene una menor zona de estancamiento y circulación gracias a al flujo que se reintegra en la parte inferior gracias al difusor. Aunque claramente las dimensiones de estas zonas incrementan en comparación al caso base y el caso con difusor recto debido a la interacción del flujo con el alerón alar.

Con el criterio Q de turbulencias de la figura 5.30, se tiene un ligero decremento en las turbulencias en las estelas del alerón, así mismo, ocurre una baja en la longitud horizontal de la estela de turbulencias al considerar la vorticidad. En cuanto a la energía de las turbulencias, se produce una reducción de la magnitud de estas respecto a aquellas presentes en el caso con alerón.

Explicando las fuerzas de sustentación, en los contornos de presión relativa de la figura 5.29, se repite el efecto del alerón alar de generar una zona de presión sobre él a la vez que disminuye la zona de presión media sobre el techo del vehículo, pero la implementación del difusor genera un aumento de la magnitud de esta, evidenciado por el cambio en la coloración.

6.3.4. Alerón alar (Wing) y difusor curvo

Los resultados de este caso de la tabla 5.18 presentan uno de los casos más notables, donde el difusor curvo interactúa constructivamente con el alerón alar, disminuyendo considerablemente los efectos negativos de este sobre la fuerza de arrastre, con un incremento promedio de un 6,24 %, en mayor medida que la combinación de alerón alar y difusor recto con aumentos promedios de 9,9 % y 4,5 % respectivamente. Este efecto es a su vez correspondido por una importante disminución de la fuerza de sustentación con un promedio de 68,5 %, aunque no mayor al mejor caso respecto a este parámetro de la unión del alerón spoiler y difusor curvo cuya disminución es de 77,4 %.

En los resultados gráficos de la figura 5.32, el contorno de velocidad indica como el difusor curvo genera una disminución de la zona con aire sin velocidad, siendo mayor al caso con un difusor recto pero teniendo una zona de transición y mayor del flujo cercano al pavimento. Esto se ve reflejado en las líneas de flujo más ordenadas y con una recirculación más compacta.

Mientras que las turbulencias observadas en la figura 5.33, inicialmente no parece haber una mayor diferencia respecto al caso con alerón alar y difusor recto al observar la vorticidad y Q-Criterion. Las diferencias son más prominentes al observar la energía cinética de turbulencias, las cuales presentan un perfil similar al caso con solo el difusor curvo, en el cual, mirando la combinación anterior o el caso con solo el alerón alar, se tiene una menor magnitud de la energía.

En cuanto a las presiones que generan fuerzas sobre este modelo, el caso es bastante similar al caso con alerón alar y difusor recto al observar los contornos de presión de la figura 5.32, lo que se ve representado en la baja diferencia de las fuerzas de sustentación, mientras un ligero cambio ocurre en la subida de presión evidenciada en el contorno en la parte posterior al vehículo.

6.3.5. Análisis global

Los análisis de resultados producto de las simulaciones a las diferentes velocidades para los modelos, indican que las modificaciones estudiadas se clasifican en 2 conjuntos según su efecto

principal; modificaciones orientadas a la disminución del coeficiente de arrastre con el difusor recto; y modificaciones cuya instalación disminuye la fuerza de sustentación en el vehículo: ambos alerones y el difusor curvo.

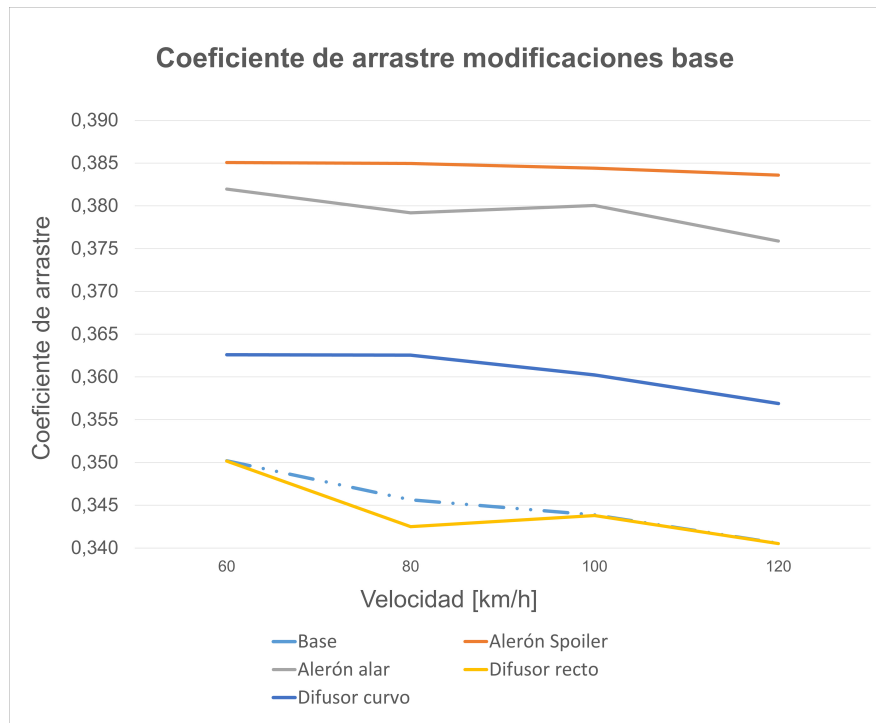


Figura 6.4: Gráfica de evolución de coeficiente de arrastre de las modificaciones individuales

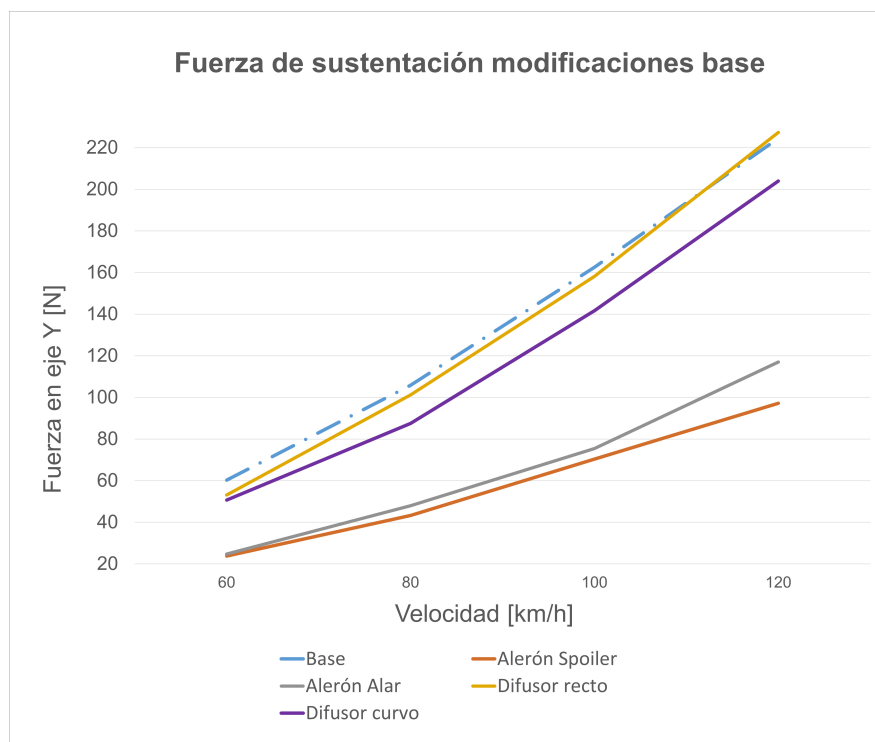


Figura 6.5: Gráfica de evolución de fuerzas de sustentación de las modificaciones individuales

Considerando ahora todos los casos, se tiene que cada modificación afecta la aerodinámica del vehículo independiente de la velocidad, mostrando su eficacia incluso a velocidades de 60 [km/h] como se observa en las figuras 6.4 y 6.5.

Considerando la siguiente tabla de comparación del efecto generado de manera porcentual para el coeficiente de arrastre, se observa que el efecto de las modificaciones a la carrocería aumenta a medida que crece la velocidad, evidenciado por la creciente diferencia respecto al caso base. Esto se explica debido a que el flujo de aire se ve bruscamente interrumpido, o facilitado en el caso del difusor recto, por estas geometrías y resultando en un aumento de turbulencias, zonas de estelas y desorden del flujo en comparación al caso base. Esto puede apreciarse en los resultados gráficos a múltiple velocidad expuestos en la sección correspondiente al caso base y los casos expuestos en el Anexo E.

Tabla 6.1: Diferencias porcentuales del coeficiente de arrastre respecto al caso base

Velocidad [km/h]	Porcentaje de reducción de coeficiente de arrastre								
	Base	Alerón Spoiler	Alerón alar	Difusor recto	Difusor curvo	Spoiler y difusor recto	Spoiler y difusor curvo	Wing y difusor recto	Wing y difusor curvo
60	-	9,95%	9,07%	-0,01%	3,54%	11,14%	13,00%	8,71%	5,47%
80	-	11,38%	9,71%	-0,90%	4,89%	12,44%	14,36%	8,83%	6,23%
100	-	11,79%	10,52%	-0,02%	4,76%	13,25%	14,55%	9,32%	6,20%
120	-	12,63%	10,37%	-0,01%	4,79%	13,86%	15,33%	10,27%	7,08%
Media		11,44%	9,92%	-0,24%	4,49%	12,67%	14,31%	9,28%	6,24%

Por otro lado pero como se observa en la tabla 6.2, el efecto de las modificaciones sobre las fuerzas en el eje Y va disminuyendo a medida que se aumenta la velocidad, dado que solo se puede influenciar hasta cierto punto el efecto generado por la geometría de mayor tamaño que es la carrocería del vehículo.

Tabla 6.2: Diferencias porcentuales de fuerzas de sustentación respecto al caso base

Velocidad [km/h]	Porcentaje de reducción de fuerzas de sustentación								
	Base	Alerón Spoiler	Alerón alar	Difusor recto	Difusor curvo	Spoiler y difusor recto	Spoiler y difusor curvo	Wing y difusor recto	Wing y difusor curvo
60	-	-60,58 %	-58,91 %	-11,87 %	-16,00 %	-69,14 %	-76,92 %	-65,25 %	-70,03 %
80	-	-59,09 %	-54,66 %	-4,32 %	-17,33 %	-66,25 %	-75,33 %	-64,99 %	-71,18 %
100	-	-56,73 %	-53,63 %	-2,70 %	-12,82 %	-68,61 %	-79,49 %	-66,98 %	-69,58 %
120	-	-56,71 %	-47,87 %	1,29 %	-9,12 %	-61,94 %	-77,76 %	-62,83 %	-63,25 %
Media		-58,28 %	-53,77 %	-4,40 %	-13,82 %	-66,49 %	-77,38 %	-65,01 %	-68,51 %

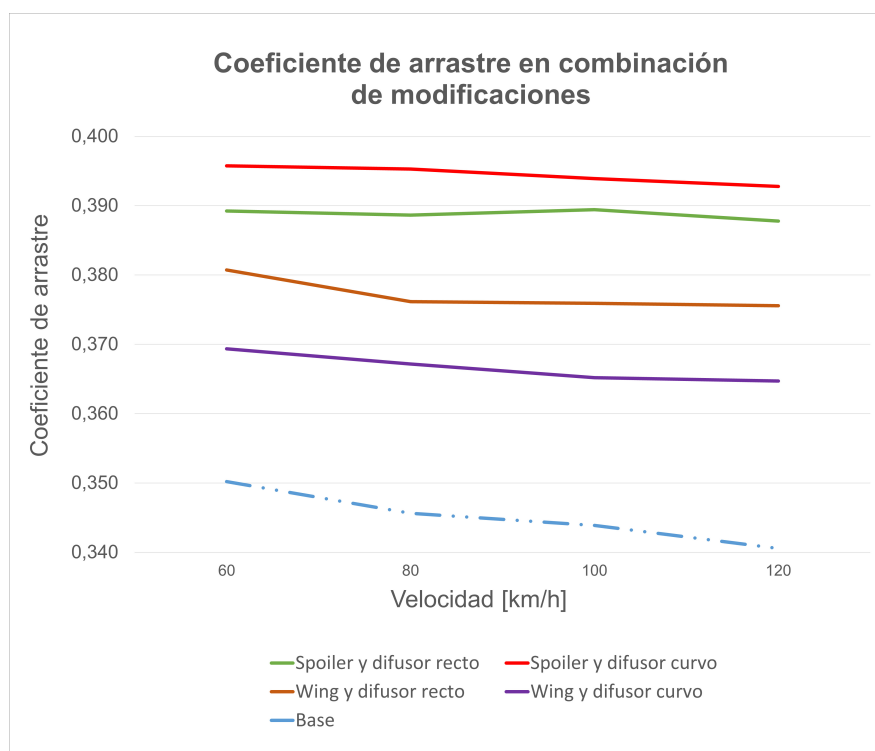


Figura 6.6: Gráfica de evolución de coeficiente de arrastre de las combinaciones de modificaciones

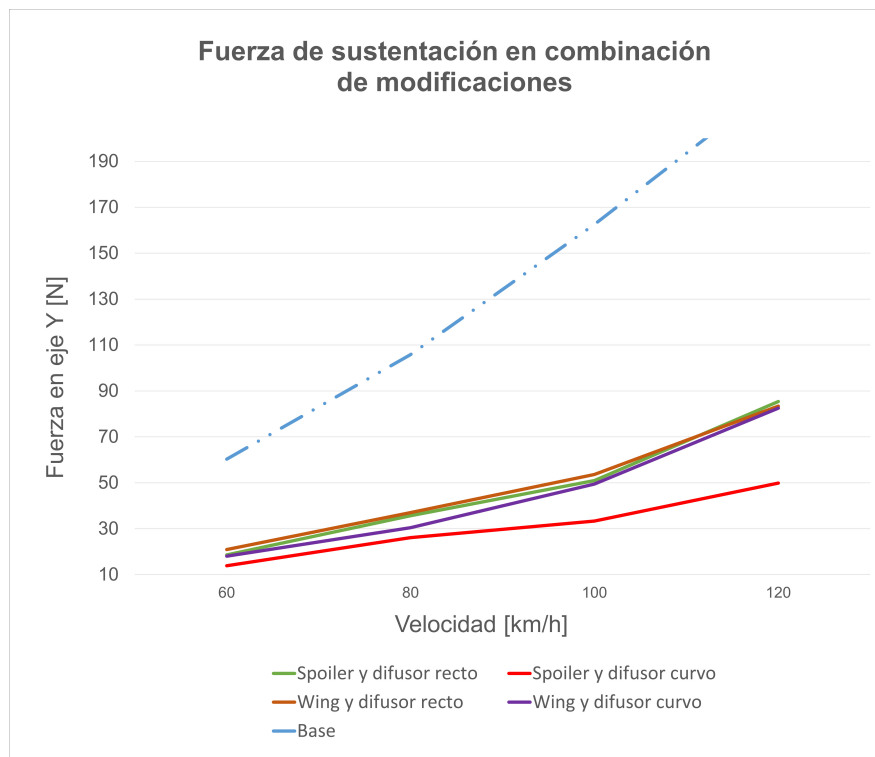


Figura 6.7: Gráfica de evolución de fuerzas de sustentación de las combinaciones de modificaciones

Con las síntesis anteriores y la discusión de cada uno de los casos, se pasa al siguiente análisis para cumplir con el objetivo del trabajo y establecer geometrías que mejoren el rendimiento aerodinámico del vehículo. Se debe notar que existen diferentes opciones posibles las cuales dependen del efecto que se busque generar, pero estas se reducen a las siguientes:

- **Difusor recto:** Coincidiendo con la literatura consultada (D. S. Nath [14], H. Zhang [18]) y los resultados de este trabajo, la instalación de un difusor de aletas rectas y expansión lineal representa la opción a elegir si el objetivo es disminuir las fuerzas de arrastre sobre el vehículo en el rango de velocidades de estudio. Aunque como fue mencionado en su respectiva sección, el estudio con una geometría más compleja puede contribuir a exponer el efecto positivo de este apéndice. Este efecto puede ser reflejado en un ambiente real como una disminución en el consumo de combustible, extender el rango efectivo de un vehículo eléctrico o alcanzar velocidades más altas sin cambiar las prestaciones del motor.
- **Alerón spoiler y difusor curvo:** Como ya fue mencionado, el efecto sobre el flujo producto de ambos apéndices actuando en conjunto, genera la mayor disminución de la fuerza de sustentación en el espectro de velocidad, por lo que si se busca un vehículo con mayor adherencia al pavimento, lo que significaría un mejor control y menores distancias de frenado al contribuir a la fuerza de roce (K. Kure [11]), esta es la combinación por la que se debe optar. Sin embargo, la desventaja de este caso recae en el considerable aumento de un 14,3% sobre el coeficiente de arrastre, lo significaría un mayor consumo de combustible que en un periodo extenso de tiempo puede resultar perjudicial.

- **Alerón alar (Wing) y difusor curvo:** Esta combinación presenta un efecto ligeramente menor que el caso de alerón spoiler y difusor curvo; disminución de un promedio de un 68,5% contra 77,4% respectivamente, por lo que comparte gran parte de los beneficios mencionados. Pero pese a presentar un aumento promedio de un 6,24% del coeficiente de arrastre, este equivale a menos de la mitad del aumento debido al efecto en conjunto del alerón spoiler y difusor curvo para cada velocidad.

Es por esto que la instalación de un alerón alar y un difusor curvo en conjunto representa una buena alternativa para disminuir las fuerzas de sustentación de un vehículo sin comprometer fuertemente el consumo de energía.

Capítulo 7

Conclusiones

Gracias al desarrollo de este trabajo se identifica como los diferentes componentes modifican las fuerzas que se manifiestan sobre un vehículo en movimiento, mientras que la aplicación y herramientas de CFD permiten analizar y explicar de manera gráfica como la interacción con el flujo genera dichos resultados. De esta manera, se cumple el objetivo planteado de presentar una serie de configuraciones que mejoran el rendimiento aerodinámico de un vehículo sedán utilizando criterios de elección respaldados por los resultados y su explicación.

El problema fue configurado correctamente gracias a la bibliografía estudiada, lo que en conjunto al estudio de mallado definió una buena configuración de mallas para el estudio, mientras el estudio de régimen descarto la utilización de un régimen estacionario. Consecuencia de esto, las interacciones con el flujo pueden ser estudiadas expeditamente a lo largo del dominio a través de los diferentes modelos y velocidades de forma simple y rápida. De esta manera, se obtuvo las fuerzas verticales y las fuerzas de arrastre con sus respectivos coeficientes sobre el vehículo de serie, estudiando a la vez como se comporta el flujo original gracias a los resultados gráficos.

Una vez llevada a cabo el resto de simulaciones y con los resultados numéricos, se establece que las modificaciones, tanto por separadas como por si solas, tienen efecto incluso en las velocidades más bajas, aunque el que tanto modifican el comportamiento depende levemente de la velocidad de estudio. Elementos que modifiquen las fuerzas de arrastre aumentan su efecto a medida que aumenta la velocidad, mientras que en el caso de modificaciones a las fuerzas en el eje Y van reduciendo lentamente su efecto.

El efecto de las modificaciones estudiadas es principalmente la disminución de las fuerzas de sustentación que experimenta el vehículo, siendo el alerón spoiler aquella que genera mayores fuerzas en el eje vertical negativo con una disminución promedio de un 58,3%, seguido por el alerón alar con una disminución promedio de 53,7%, luego el difusor curvo con decrecimiento de 13,8% en promedio y finalmente el difusor recto tiene una baja reducción de solo un 4,40%. Mientras que respecto al coeficiente de arrastre, el alerón spoiler genera un incremento promedio de un 11,4%, el alerón alar un aumento de 9,9% en promedio y el difusor curvo un media de crecimiento de 4,5%; siendo el difusor recto el único dispositivo que genera un efecto positivo, aunque acotado, con un reducción promedio de un 0,24%.

Siendo ya mencionado, una de las razones por las que los difusores no generan un efecto tan positivo respecto al coeficiente de arrastre es el hecho de que dada la utilización de geometrías

simplificadas, no ocurre una mayor perturbación del flujo que pasa por la parte inferior, reduciendo parte del efecto de transición generado. Esto permite mejorar un punto como se analizó en la sección anterior, ya que los resultados producto de una simulación con un modelo que incluye elementos mecánicos del tren de transmisión, el sistema de escape y/o la suspensión del vehículo indican que estos generan una alteración del flujo que puede impactar el efecto de difusores.

Como se abordó en el análisis, el efecto de instalar varios elementos no es simplemente la fusión de los efectos de cada modificación por separado, pues la interacción es más compleja y debe ser estudiada con atención, ya que como fue obtenido en los resultados, existen combinaciones que no presentan mayor beneficio y son superadas por otras que si presentan algún tipo de sinergia. Tales son los casos del acople de un difusor recto en conjunto de alerón spoiler donde se aumenta el coeficiente de arrastre, y el caso de la interacción entre un difusor curvo y el alerón a alar donde los efectos negativos de este sobre las fuerzas de arrastre son contrarrestados por aquellos del difusor curvo.

Abordando el objetivo principal de este trabajo, se concluye que existen 3 configuraciones que mejoran la aerodinámica del vehículo original, descartando aquellas que ven su desempeño opacado por estas 3. Primero se tiene la instalación de un difusor recto, el cual disminuye las fuerzas de arrastre que se oponen al paso del vehículo, representando así una disminución de la potencia necesaria. En segundo lugar se tiene la combinación de un alerón spoiler y un difusor curvo para generar una fuerte disminución de las fuerzas de sustentación en el vehículo y generar una máxima adherencia al pavimento, pero con el coste de un significativo aumento al coeficiente de arrastre. Por último, se tiene la recomendación de utilizar un alerón alar y un difusor curvo, la cual genera una considerable fuerza de carga sobre el vehículo sin el gran aumento sobre la fuerza de arrastre de la configuración anterior, cuidando así el consumo de energía.

La implementación de estas configuraciones puede ayudar a disminuir la ocurrencia de accidentes en las configuraciones que intensifican el contacto con la pista, donde dado que las modificaciones se encuentran en la parte trasera, esto puede resultar útil en vehículos que tengan un distribución de peso menor en la parte trasera o en vehículos que sufran de sobreviraje, aunque la magnitud del efecto requiere su propio estudio. En cuanto al caso del difusor recto al disminuir las fuerzas opuestas al movimiento, el consumo de combustible se ve reducido, lo que puede ayudar en viajes de largas distancias o incrementar el rango antes de que un vehículo eléctrico debe detenerse para recargarse, considerando el reducido número de estaciones de carga en nuestro país.

Considerando el tiempo y los recursos computacionales de este trabajo, es posible obtener mejores resultados mediante la implementación de modelos más complejos y mallados más finos que permitan acercarse mucho más a la realidad con un estudio más extenso. De esta forma, se pueden generar mejores resultados para respaldar incluso el estudio experimental con un vehículo real, ya que los estudios CFD no son definitivos en cuanto al diseño final, pero si son capaces de entregar una dirección de los resultados durante las etapas previas.

Por otra parte, este estudio solo considera los resultados respecto a la aerodinámica de las modificaciones, cuando en un escenario real pueden existir otros criterios que afecten la respuesta final: costos de manufactura, disponibilidad física para instalar los elementos y ciertas regulaciones que prohíban el uso de estas modificaciones. Así, se tiene otra expansión para complementar el trabajo.

Bibliografía

- [1] B. Jiménez. (Septiembre de 2015). *ESTUDIO MECÁNICO Y AERODINÁMICO DEL COMPORTAMIENTO DEL ALERÓN TRASERO DE UN AUTOMÓVIL* . Universidad Carlos III. Madrid, España.
- [2] Fraija B., Iskandar. (2006). *Estudio de la aerodinámica en los vehículos*. Universidad Autónoma del Caribe. Colombia.
- [3] Mohsen Jahanmiri. (Marzo de 2019). *EXPERIMENTAL SURVEY OF THE EFFECT OF SPOILER HEIGHT AND DIFFUSER ON AERODYNAMIC COEFFICIENTS OF A GENERIC CAR*. Shiraz University of Technology. Shiraz, Iran.
- [4] Dibyajyoti Laha. *Computational aerodynamic analysis of a rear spoiler on a car in two dimensions*. Anglia Ruskin University. Cambridge, Inglaterra.
- [5] Firdaus Azmi. (Abril 2017). *VEHICLE AERODYNAMICS ANALYSIS OF A MULTI PURPOSE VEHICLE USING CFD*. Politeknik Sultan Azlan Shah. Perak, Malaysia.
- [6] P. Carbonell, 2014. *ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DE UN AUDI R8 MEDIANTE TÉCNICAS CFD*. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- [7] C.Martínez Armendáriz. (Julio de 2019). *Diseño y cálculo estructural del alerón trasero de un vehículo deportivo..* Universidad Carlos III. Madrid, España.
- [8] Jiyan R Patel. (Noviembre 2017). *Fluid Dynamics Simulation Of a Car Spoiler*. Chandubhai S Patel Institute of Technolgy. Cahnaga, India.
- [9] A, Henze, W. Schröder. *Fahrzeug- und Windradaerodynamik*. RWTH Aachen University. Alemania.
- [10] Marco Lanfrit. (Febrero 2005). *Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with Fluent*. Versión 1.2. Fluent Deutschland GmbH. Alemania.
- [11] Krzysztof Kurec, Michał Remer, Janusz Piechna. (26 de agosto de 2019). *The influence of different aerodynamic setups on enhancing a sports car's braking*. Warsaw University of Technology. Varsovia, Polonia.
- [12] Mustafa Cakir. (Diciembre de 2012). *CFD study on aerodynamic effects of a rear wing-spoiler on a passenger vehicle*. Santa Clara University.
- [13] Rajapaksha, R; Kurukulasooriya, K; Herath, H; Rangajeeva, S; Bandara, Priyantha. (2018). *Aerodynamic Analysis of Rear Wings and Rear Spoilers of Passenger Automobiles*. Sri Lanka.
- [14] Devang S. Nath et al., (Enero 2021). *Drag reduction by application of aerodynamic devices in a race car*. Adv. Aerodyn. Vol 3. <<https://doi.org/10.1186/s42774-020-00054-7>>.
- [15] Guerrero, A.; Castilla, R.; Eid, G. A. (Abril de 2022). *A Numerical Aerodynamic Analysis on the Effect of Rear Underbody Diffusers on Road Cars*. Applied Sciences. Vol. 12, p. 3763.

- <<https://doi.org/10.3390/app12083763>>.
- [16] Rubel Chandra Das, Mahmud Riyad. (2017). *CFD Analysis of Passenger Vehicle at Various Angle of Rear End Spoiler*. Procedia Engineering. Vol 194, p. 160-165. <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.130>>.
- [17] Ehirim, O.; Knowles, Kevin; Saddington, Alistair. (2018). A Review of Ground-Effect Diffuser Aerodynamics. Journal of Fluids Engineering. p. 141. <<https://doi.org/10.1115/1.4040501>>.
- [18] Hu, X.; Zhang, R. (2011). *Influence of Different Diffuser Angle on Sedan's Aerodynamic Characteristics*. Physics Procedia. Vol. 22, p. 239–245. <<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.038>>.
- [19] P.B. Senthilkumar, M. Parthasarathy. (2022). *Design and analysis of a rear diffuser in a sedan car*. Materials Today: Proceedings. Vol. 52, p. 1324-1339. <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.542>>.
- [20] A. Huminic, G. Huminic. (2017). *Aerodynamic study of a generic car model with wheels and underbody diffuser*. Int.J Automot. Technol. Vol. 18, p. 397–404. <<https://doi.org/10.1007/s12239-017-0040-6>>.
- [21] C. Friedl, M. Watts. (2013). *Drag Coefficient Measurement, CFD Simulation and Validation of an Automotive Body*. SAE Technical Paper Series. <<https://doi.org/doi:10.4271/2013-01-1363>>.
- [22] *Car Aerodynamics Basics and How-To Design Tips*. Revisado el 29 de agosto de 2022 desde: <<https://www.buidyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/>>.
- [23] *Tutorial: Aerodynamics Simulation of Flow Around a Vehicle*. Revisado el 05 de septiembre de 2022 desde: <<https://www.simscale.com/docs/tutorials/aerodynamic-simulation-vehicle/>>.
- [24] DFL 1, Ley no. 18.290, Artículo 145. Diario Oficial de la República de Chile, 29 de octubre de 2009.

Anexos

Anexo A. Vistas del vehículo utilizado como referencia

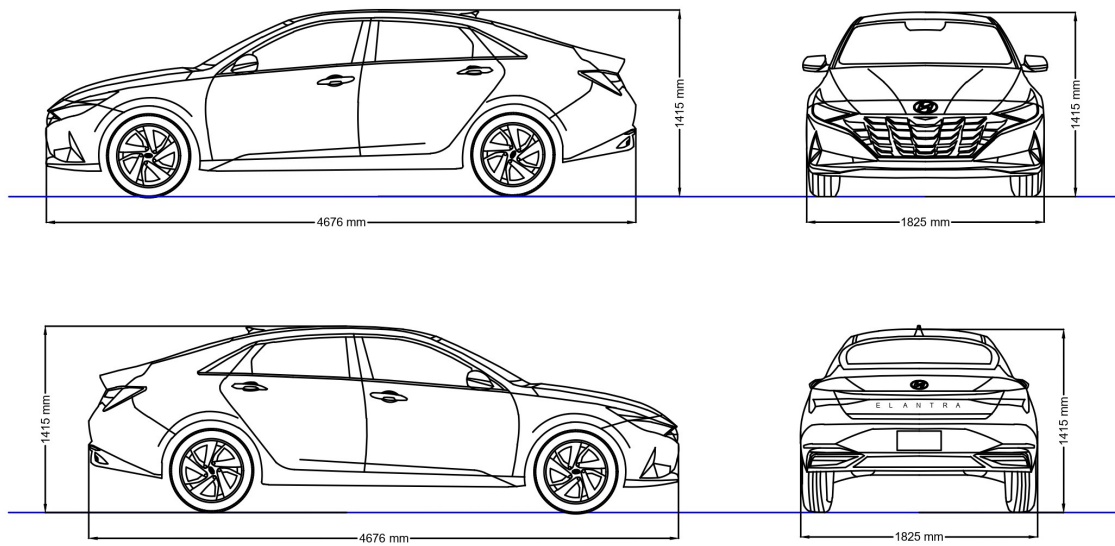


Figura A.1: Dimensiones de Hyundai Elantra 2021

Anexo B. Datos vehículo utilizado como referencia

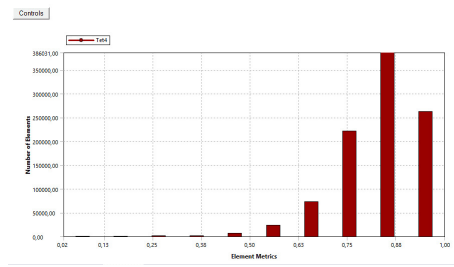
2021 Elantra Specifications

DIMENSIONS/WEIGHTS/CAPACITIES		SE	SEL	BLUE HEV	LIMITED	LIMITED HEV	N LINE
Exterior (inches)		SE	SEL	BLUE HEV	LIMITED	LIMITED HEV	N LINE
Wheelbase		107.1	←	←	←	←	←
Overall Length		184.1	←	←	←	←	←
Overall Width		71.9	←	←	←	←	←
Overall Height		55.7	←	←	←	←	55.9
Track Width (front/rear) – 15"		62.7/63.1	←	←	←	←	←
Track Width (front/rear) – 16"		-	62.4/62.8	62.4/63.0	-	-	-
Track Width (front/rear) – 17"		-	62.2/62.6	-	62.2/62.7	62.2/62.6	-
Track Width (front/rear) – 18"		-	←	←	←	←	61.7/62.2
Overhang (front/rear)		35.2/41.7	←	←	←	←	←
Minimum Ground Clearance		5.3	←	5.5	←	5.5	5.5
Coefficient of Drag (Cd)		0.28	←	←	←	←	0.31
Interior (inches)		SE	SEL	BLUE HEV	LIMITED	LIMITED HEV	N LINE
Head Room (front/rear)		40.6 (38.7 w/ sunroof) / 37.3	←	←	←	←	←
Lag Room (front/rear)		42.3/38.0	←	←	←	←	←
Shoulder Room (front/rear)		56.5/55.6	←	←	←	←	←
Hip Room (front/rear)		53.4/50.5	←	←	←	←	←
Weights		SE	SEL	BLUE HEV	LIMITED	LIMITED HEV	N LINE
Curb (lbs.)	IVT MT DCT	2,725 – 2,868	2,725 – 2,868	- 2,965	2,725 – 2,868	- 3,069	- 2,954 3,020
GVWR (lbs.)	IVT	3,858	3,858	-	3,858	-	-
GDI				4,079		4,079	3,924(MT) & 3,990 (DCT)

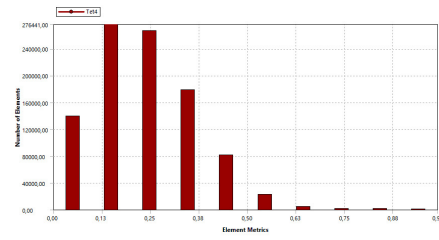
Figura B.1: Extracto de catálogo de Hyundai Elantra 2021

Anexo C. Estudio independencia de mallado

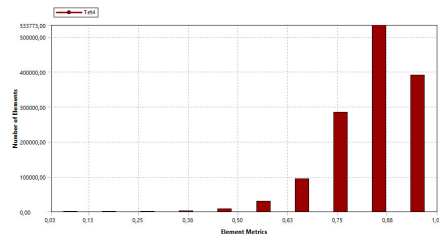
Los parámetros de calidad de la mallas utilizadas durante el estudio de independencia de mallas se exponen a continuación:



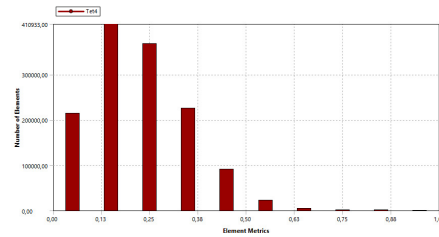
(a) Calidad malla base



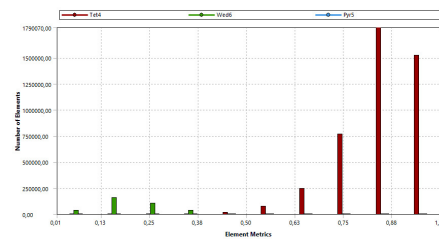
(b) Skewness malla base



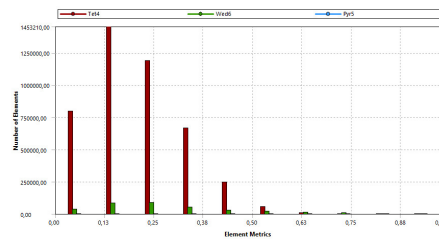
(c) Calidad malla con refinado en alerón



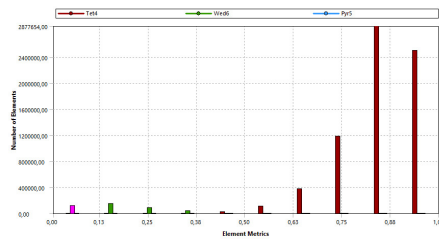
(d) Skewness malla con refinado en alerón



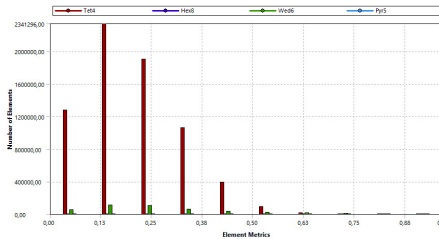
(e) Calidad malla con Inflation y zona refinada en alerón



(f) Skewness malla con Inflation y zona refinada en alerón



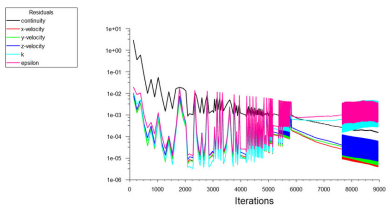
(g) Calidad Malla con Inflation y refinado múltiple



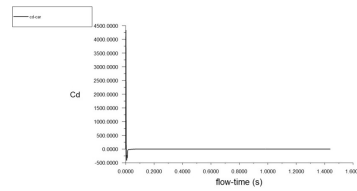
(h) Skewness Malla con Inflation y refinado múltiple

Figura C.1: Mallas utilizadas para el estudio de independencia

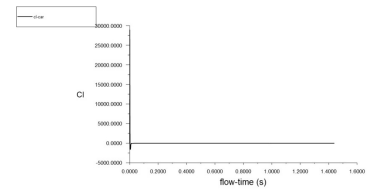
Mientras que las convergencias de los residuos y los coeficientes se tiene a continuación:



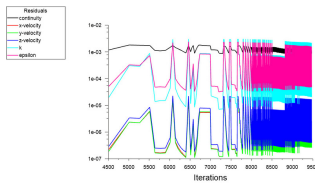
(a) Convergencia de residuos malla base



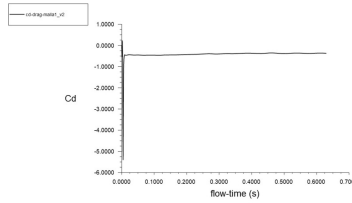
(b) Convergencia de coeficiente de arrastre malla base



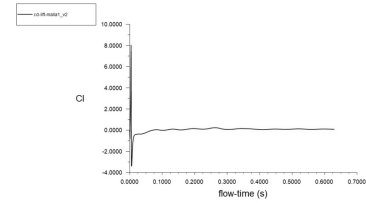
(c) Convergencia de coeficiente de sustentación malla base



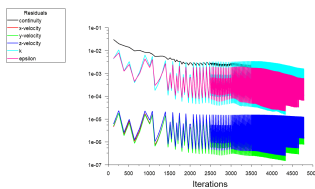
(d) Convergencia de residuos malla con refinado en alerón



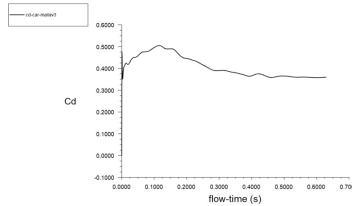
(e) Convergencia de coeficiente de arrastre malla con refinado en alerón



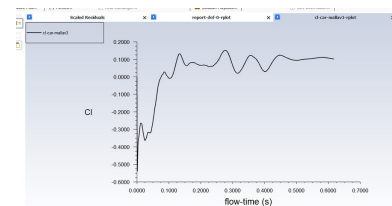
(f) Convergencia de coeficiente de sustentación malla con refinado en alerón



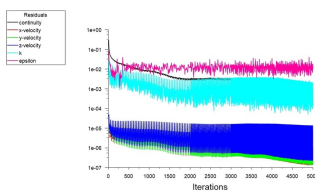
(g) Convergencia de residuos Malla con Inflation y zona refinada en alerón



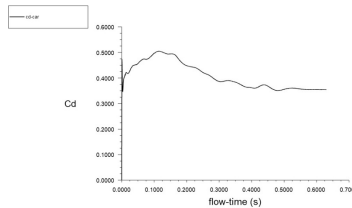
(h) Convergencia de coeficiente de arrastre Malla con Inflation y zona refinada en alerón



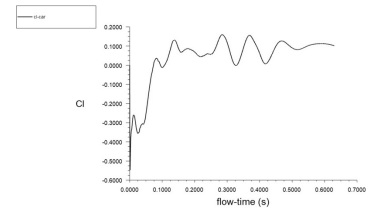
(i) Convergencia de coeficiente de sustentación Malla con Inflation y zona refinada en alerón



(j) Convergencia de residuos Malla con Inflation y refinado múltiple



(k) Convergencia de coeficiente de arrastre Malla con Inflation y refinado múltiple

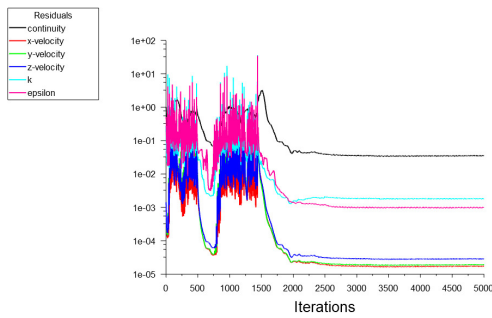


(l) Convergencia de coeficiente de sustentación Malla con Inflation y refinado múltiple

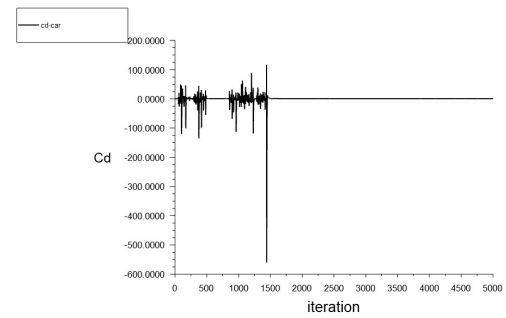
Figura C.2: Convergencia estudio de independencia

Anexo D. Estudio de Régimen

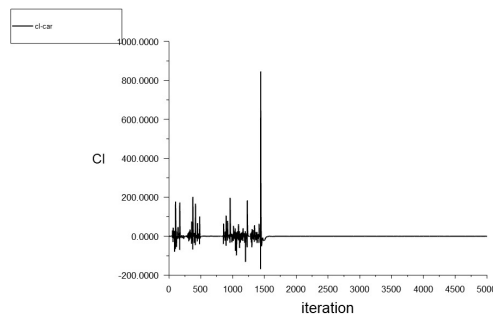
A continuación se tienen la convergencia de las simulaciones bajo régimen estacionario.



(a) Convergencia de residuos

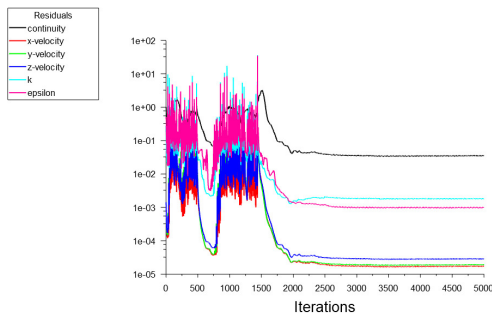


(b) Convergencia de coeficiente de arrastre

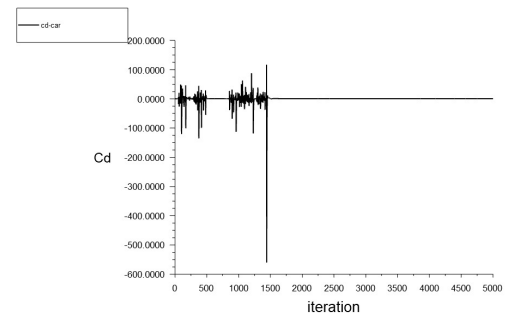


(c) Convergencia de coeficiente de sustentación

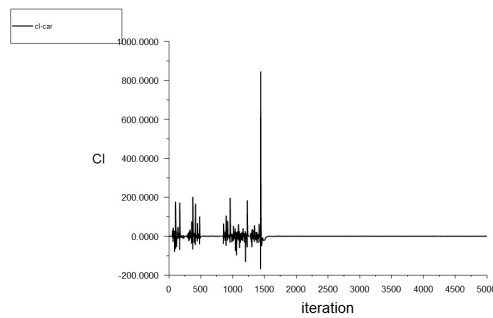
Figura D.1: Resultados de simulación de 1000 iteraciones bajo régimen estacionario



(a) Convergencia de residuos



(b) Convergencia de coeficiente de arrastre



(c) Convergencia de coeficiente de sustentación

Figura D.2: Resultados de simulación de 5000 iteraciones bajo régimen estacionario

Anexo E. Detalle de Resultados

De manera de respaldar las simulaciones y sus resultados, se incluyen la completa extensidad de estos a través de las velocidades en los siguientes casos.

E.1. Vehículo base

Extendiendo el estudio expuesto en los resultados de fuerzas del vehículo base en la sección 5.1, se anexa a continuación la convergencia de los residuos y los coeficientes.

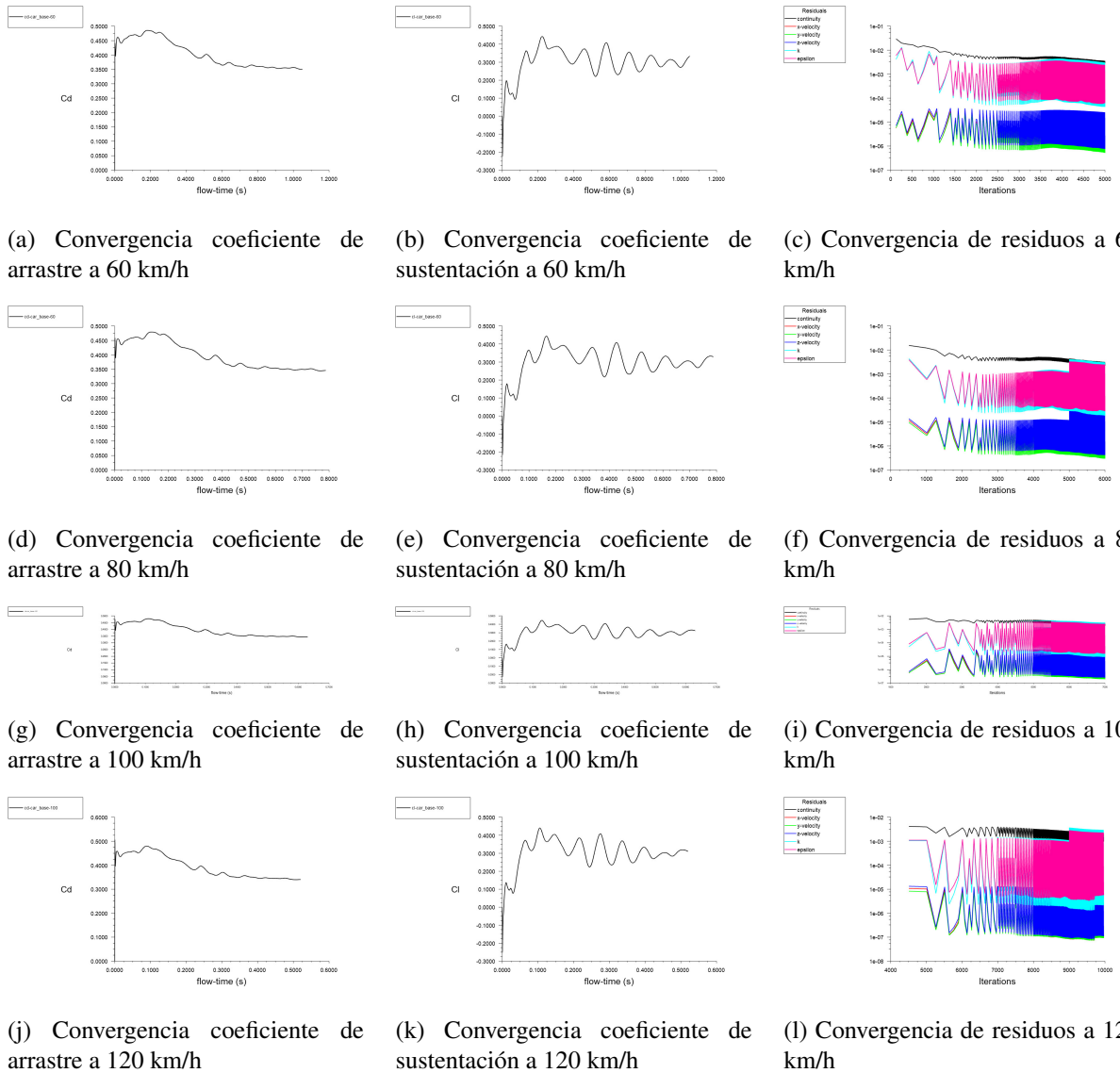


Figura E.1: Convergencia estudio de independencia

Como se puede apreciar, exhibir las convergencias de cada uno de los resultados numéricos y de los residuos resulta extenso y alarga innecesariamente la extensión del documento. Por esto se omite durante la presentación de resultados

E.2. Vehículo con alerón spoiler y difusor recto

A continuación se expone una versión extendida de los resultados gráficos de este caso para exhibir las interacciones y su evolución en función de la velocidad.

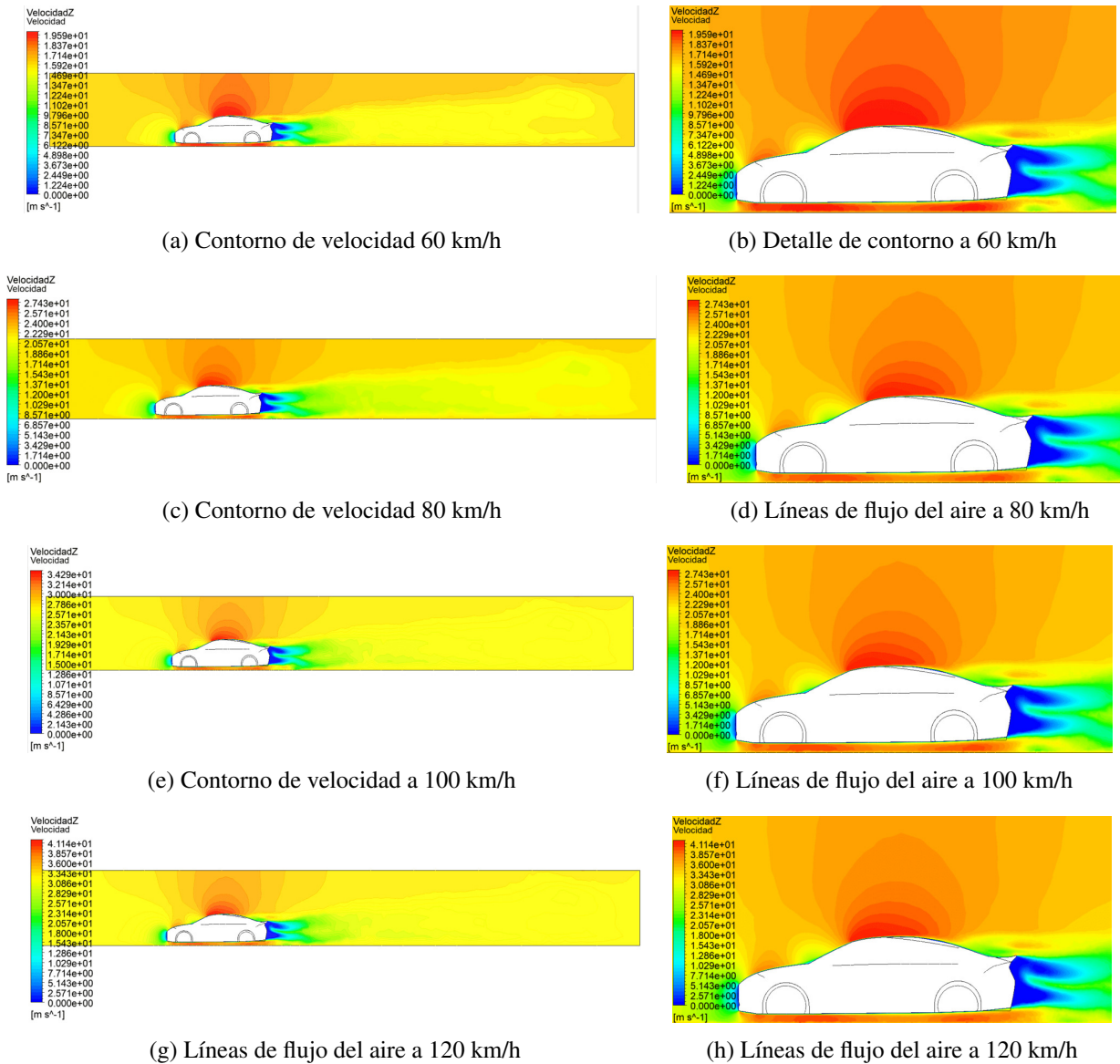
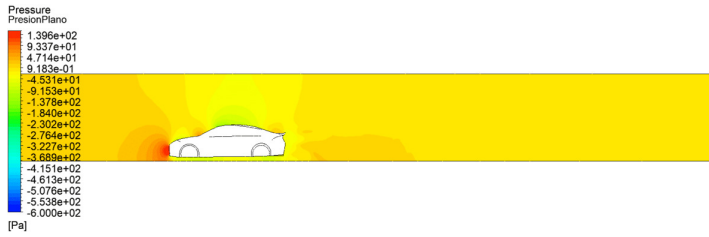
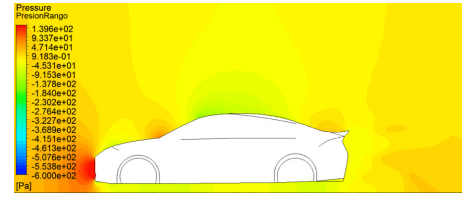


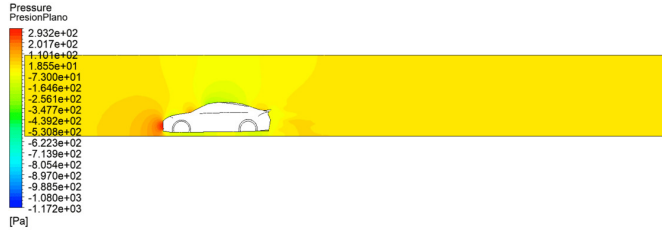
Figura E.2: Contornos de velocidad alrededor del vehículo con alerón spoiler y difusor recto



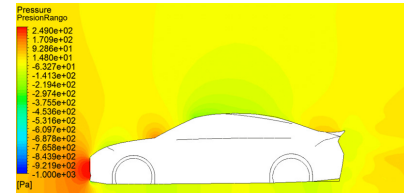
(a) Contorno de presión a 60 km/h



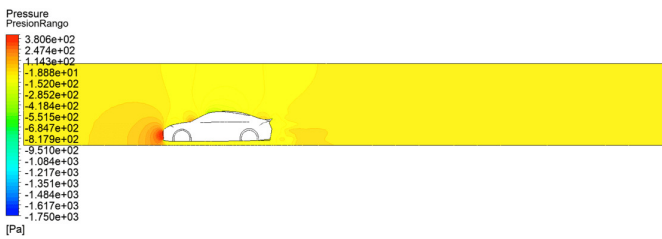
(b) Detalle de presión a 60 km/h



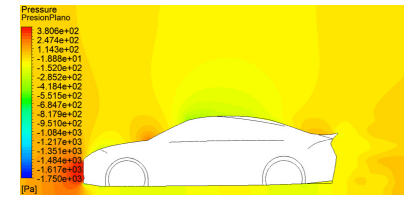
(c) Contorno de presión a 80 km/h



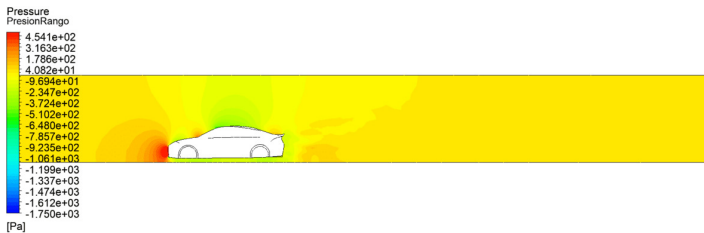
(d) Detalle de presión a 80 km/h



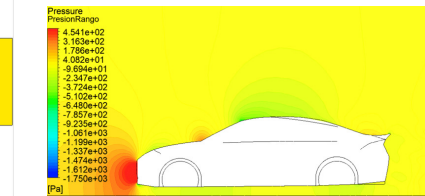
(e) Contorno de presión a 100 km/h



(f) Detalle de presión a 100 km/h

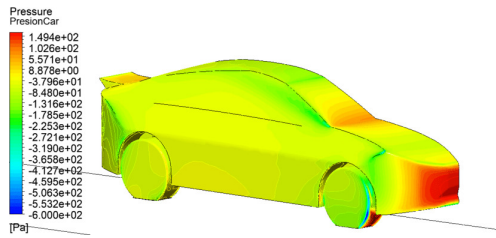


(g) Contorno de presión a 120 km/h

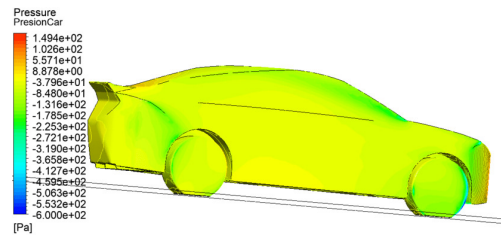


(h) Detalle de presión a 120 km/h

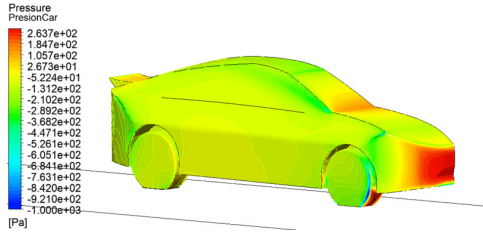
Figura E.3: Contornos de presión alrededor del vehículo con alerón spoiler y difusor recto



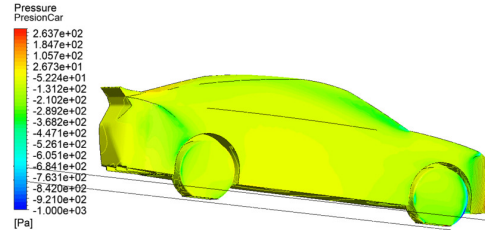
(a) Presiones en la área frontal a 60 km/h



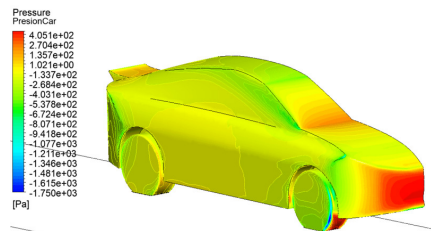
(b) Presiones en el área trasera a 60 km/h



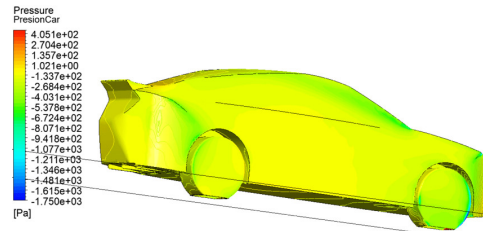
(c) Presiones en la área frontal a 80 km/h



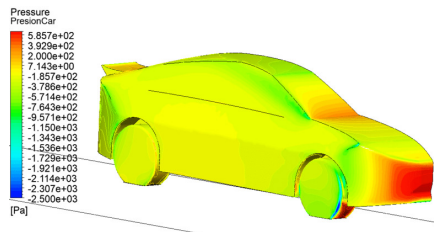
(d) Presiones en el área trasera a 80 km/h



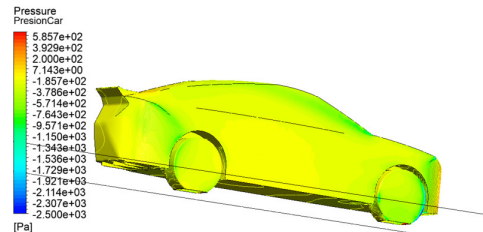
(e) Presiones en la área frontal a 100 km/h



(f) Presiones en el área trasera a 100 km/h

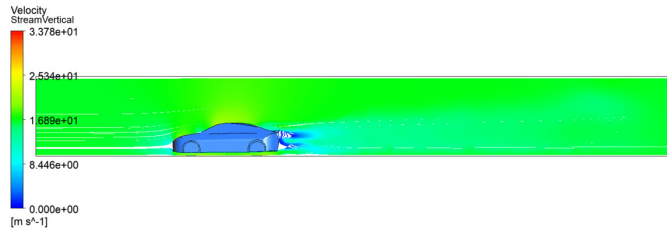


(g) Presiones en la área frontal a 120 km/h

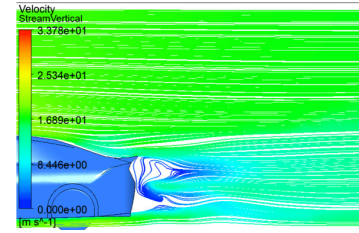


(h) Presiones en el área trasera a 120 km/h

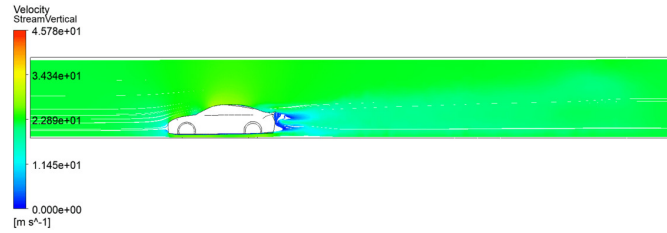
Figura E.4: Contornos de presión en la carrocería del vehículo con alerón spoiler y difusor recto



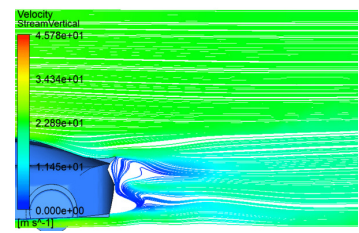
(a) Líneas de flujo a 60 km/h



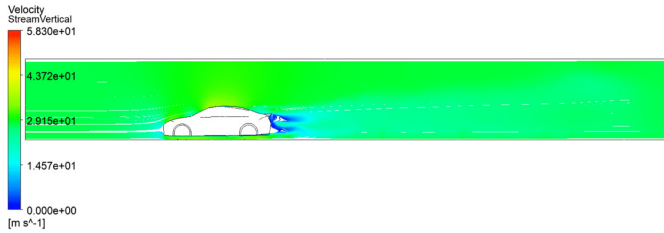
(b) Detalle de líneas de flujo a 60 km/h



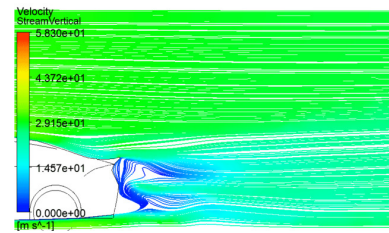
(c) Líneas de flujo a 80 km/h



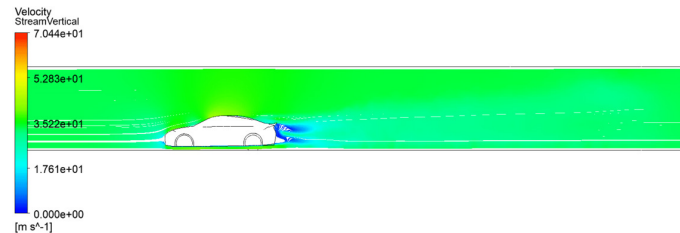
(d) Detalle de líneas de flujo a 80 km/h



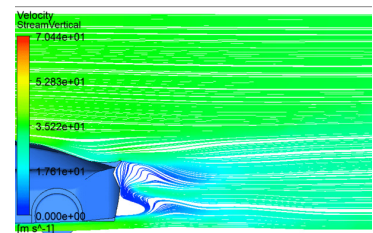
(e) Líneas de flujo a 100 km/h



(f) Detalle de líneas de flujo a 100 km/h

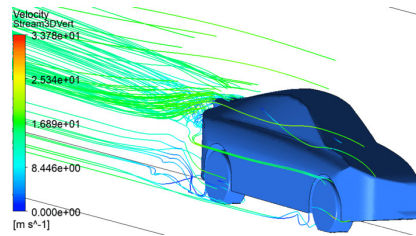


(g) Líneas de flujo a 120 km/h

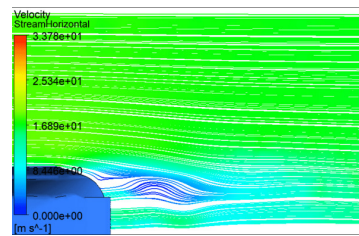


(h) Detalle de líneas de flujo a 120 km/h

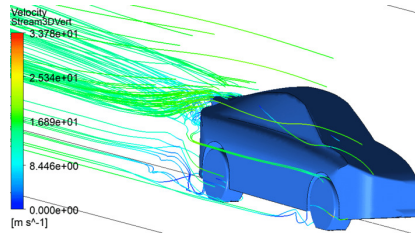
Figura E.5: Líneas de flujo horizontales alrededor del vehículo con alerón spoiler y difusor recto



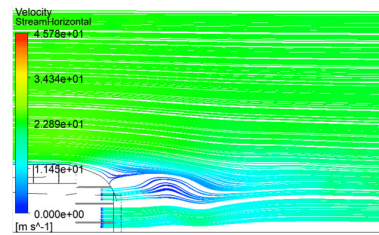
(a) Líneas de flujo en 3D a 60 km/h



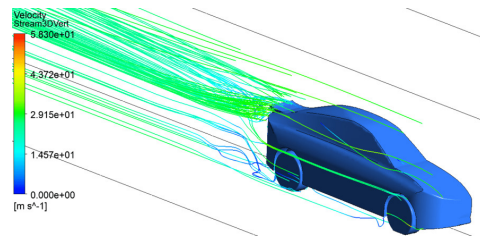
(b) Líneas de flujo en altura de un difusor a 60 km/h



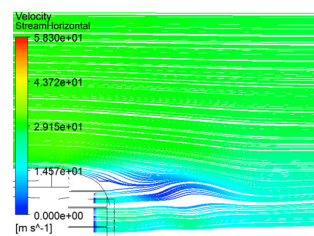
(c) Líneas de flujo en 3D 80 km/h



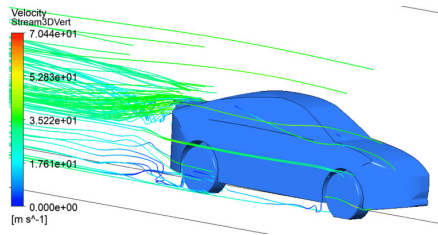
(d) Líneas de flujo en altura de un difusor a 80 km/h



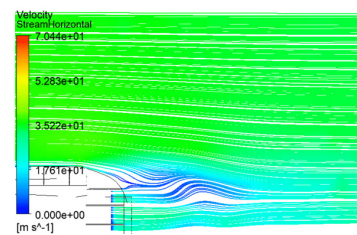
(e) Líneas de flujo en 3D a 100 km/h



(f) Líneas de flujo en altura de un difusor a 100 km/h

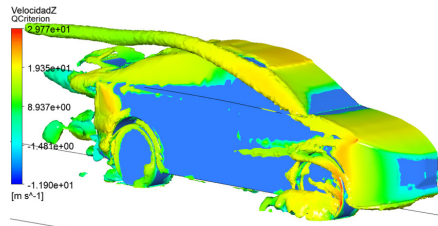


(g) Líneas de flujo en 3D a 120 km/h

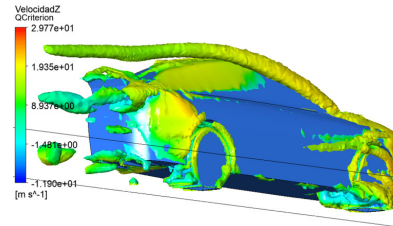


(h) Líneas de flujo en altura de un difusor a 120 km/h

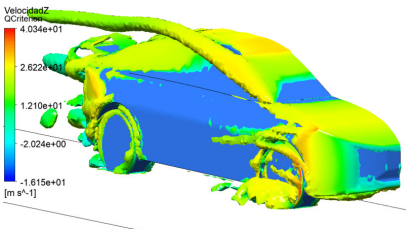
Figura E.6: Líneas de flujo 3D y en difusor en vehículo con alerón spoiler y difusor recto



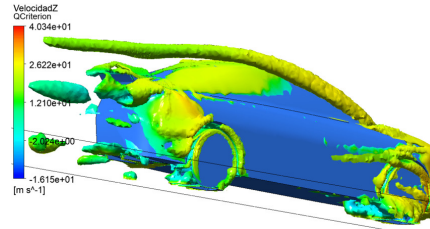
(a) Turbulencias según Q-Criterion a 60 km/h



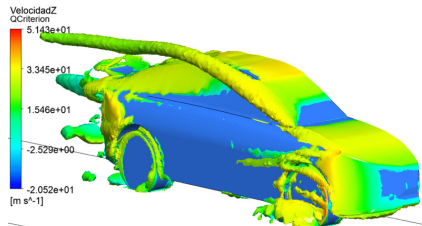
(b) Turbulencias en la parte trasera según Q-Criterion a 60 km/h



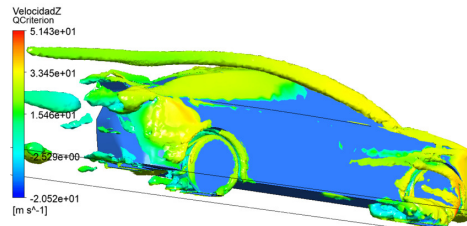
(c) Turbulencias según Q-Criterion a 80 km/h



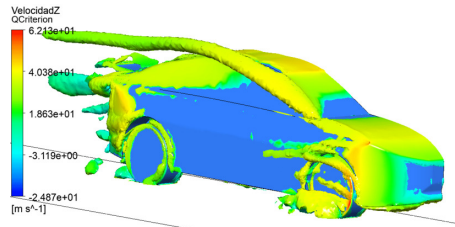
(d) Turbulencias en la parte trasera según Q-Criterion a 80 km/h



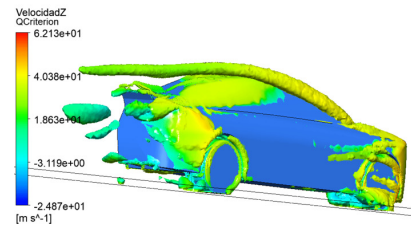
(e) Turbulencias según Q-Criterion a 100 km/h



(f) Turbulencias en la parte trasera según Q-Criterion a 100 km/h

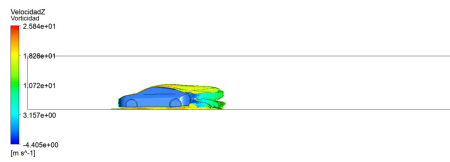


(g) Turbulencias según Q-Criterion a 120 km/h

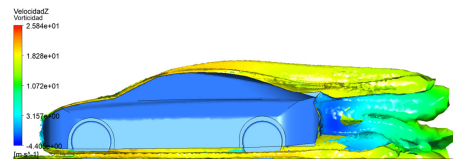


(h) Turbulencias en la parte trasera según Q-Criterion a 120 km/h

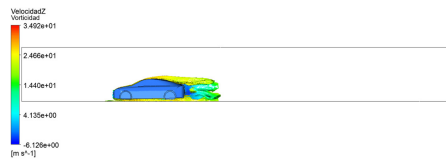
Figura E.7: Turbulencias según Q-Criterion en el vehículo con alerón spoiler y difusor recto



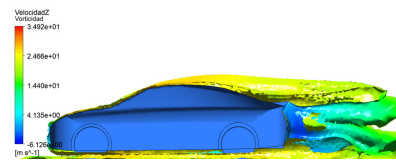
(a) Turbulencias según Vorticidad a 60 km/h



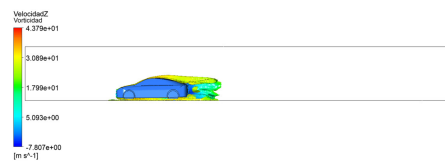
(b) Detalle de vorticidad a 60 km/h



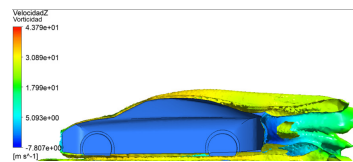
(c) Turbulencias según Vorticidad a 80 km/h



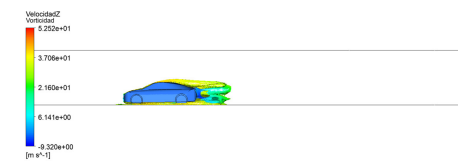
(d) Detalle de vorticidad a 80 km/h



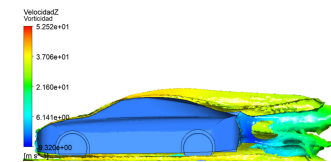
(e) Turbulencias según Vorticidad a 100 km/h



(f) Detalle de vorticidad a 100 km/h

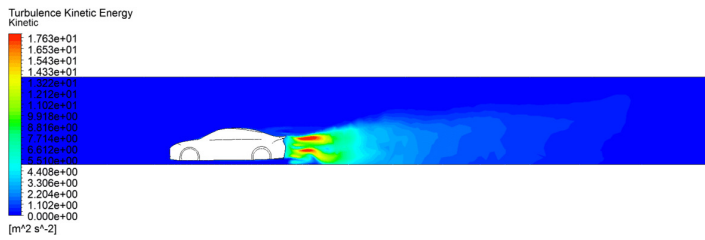


(g) Turbulencias según Vorticidad a 120 km/h

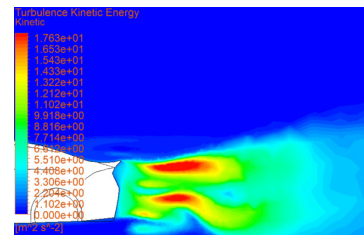


(h) Detalle de vorticidad a 120 km/h

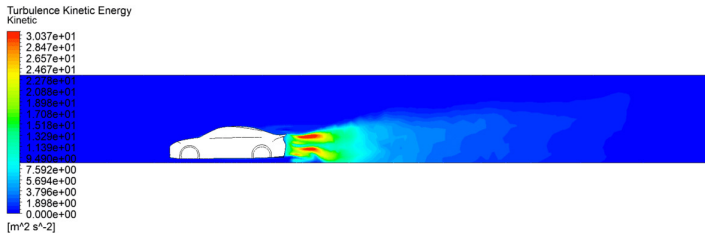
Figura E.8: Vorticidad de turbulencias en el vehículo con alerón spoiler y difusor recto



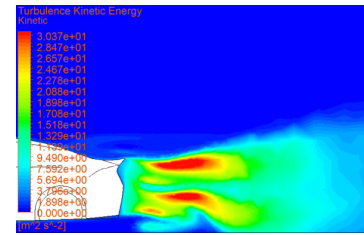
(a) Energía cinética de turbulencias a 60 km/h



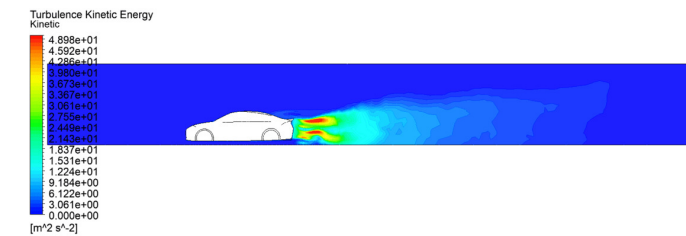
(b) Vorticidad en la parte trasera a 60 km/h



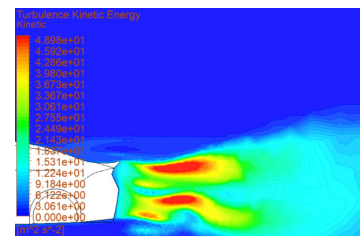
(c) Turbulencias según Q-Criterion a 80 km/h



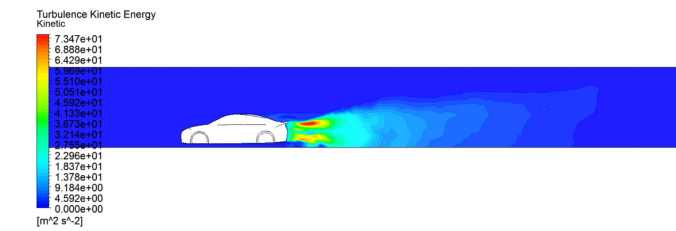
(d) Vorticidad en la parte trasera a 80 km/h



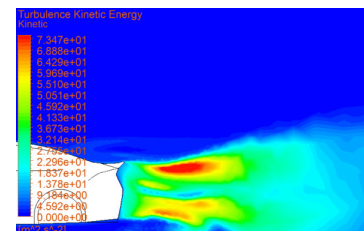
(e) Turbulencias según Q-Criterion a 100 km/h



(f) Vorticidad en la parte trasera a 100 km/h



(g) Turbulencias según Q-Criterion a 120 km/h



(h) Vorticidad en la parte trasera a 120 km/h

Figura E.9: Vorticidad de turbulencias en el vehículo con alerón spoiler y difusor recto

Al igual que el anexo anterior, adjuntar esta gran cantidad de imágenes resulta en una gran extensión del documento.

E.3. Estudio con modelo con elementos mecánicos

Como es mencionado en durante los resultados, el flujo que se acelera en la parte inferior del vehículo atraviesa relativamente ordenado hasta la parte trasera. Para complementar el análisis se anexa el siguiente caso en el cual consiste en el mismo vehículo utilizado con el difusor recto pero con geometrías en la parte inferior para simular la ubicación del eje motriz, parte del sistema de escape y la suspensión.

Siguiendo la misma configuración del resto de casos, se pasa a hacer la simulación a 100 [km/h].

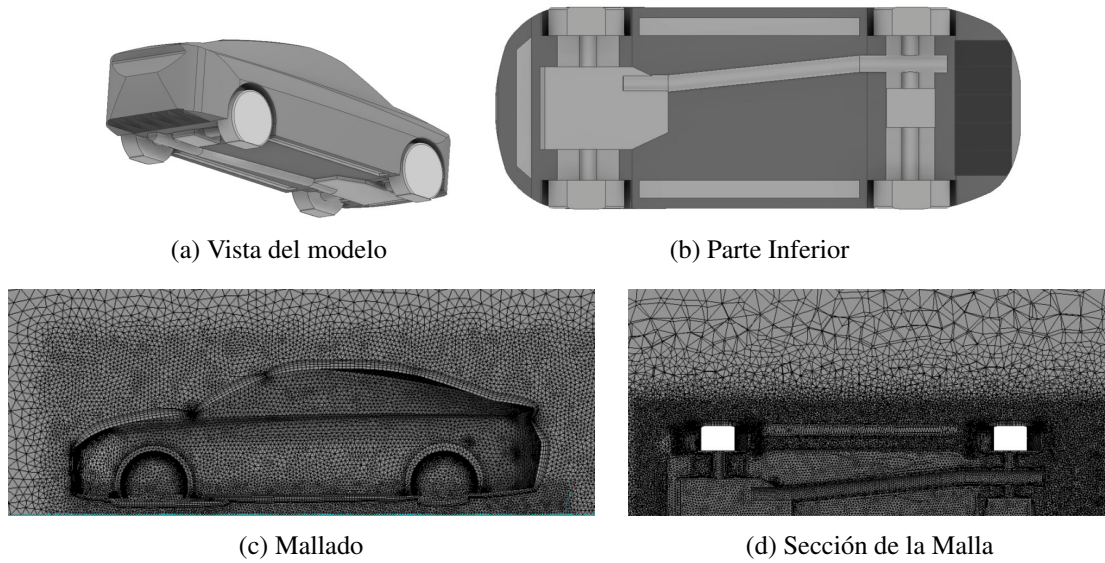


Figura E.10: Modelo y mallado del dominio del vehículo con elementos mecánicos y difusor recto

Tabla E.1: Métricas del mallado del vehículo con difusor recto y elementos mecánicos

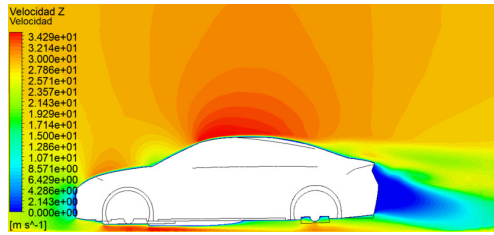
Refinamiento	Inflation	Tamaño de elemento [m]	Calidad ortogonal Mínima	Skewness Máximo	Skewness Promedio	Calidad Mínima	Calidad Promedio	Número de Elementos	Nodos
Alrededor del vehículo y en zona de alerón	5 Capas de crecimiento a 0,8	0,5	$3,57 \cdot 10^{-2}$	0,96425	0,22677	$1,65 \cdot 10^{-2}$	0,798629	9124854	2042583

Los resultados numéricos de fuerzas se exponen en la siguiente tabla:

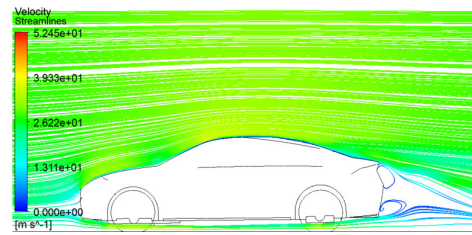
Tabla E.2: Resultados de fuerzas y coeficientes en modelo del vehículo con difusor recto y elementos mecánicos

Velocidad [km/h]	Coficiente de arrastre (CD)	Fuerza en eje Z [N]	Coficiente de sustentación (CD)	Fuerza en eje Y [N]
60	0,38223	-192,057	0,441163	206,831

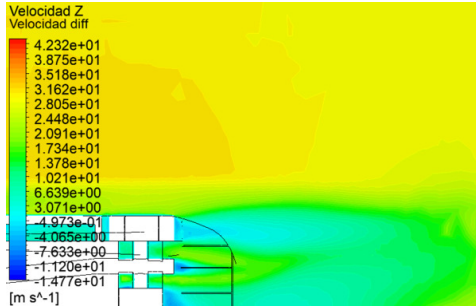
A continuación se presentan gráficamente las interacciones del flujo.



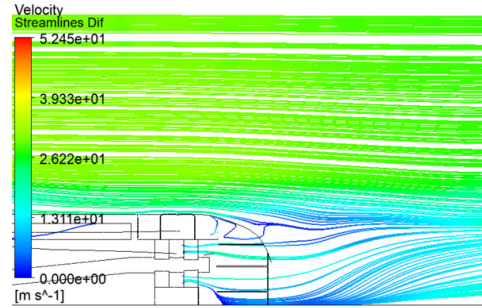
(a) Contorno de velocidad



(b) Líneas de flujo



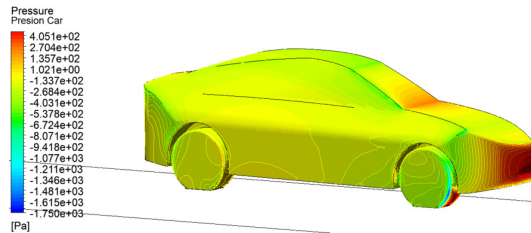
(c) Contorno de velocidad en altura de difusor



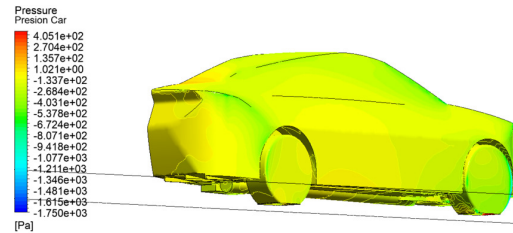
(d) Líneas de flujo en altura de difusor



(e) Contorno de presión



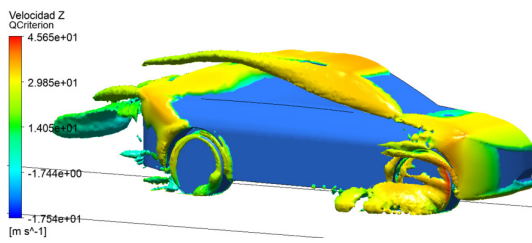
(f) Presión sobre la parte frontal del vehículo



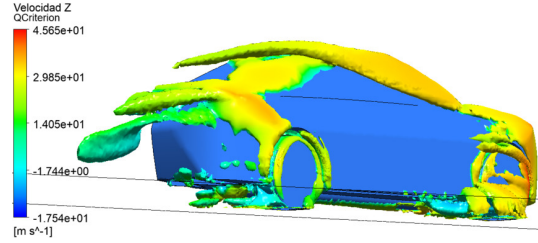
(g) Presión sobre la parte trasera del vehículo

Figura E.11: Resultados gráficos del vehículo con difusor recto y elementos mecánicos a 100 [km/h]

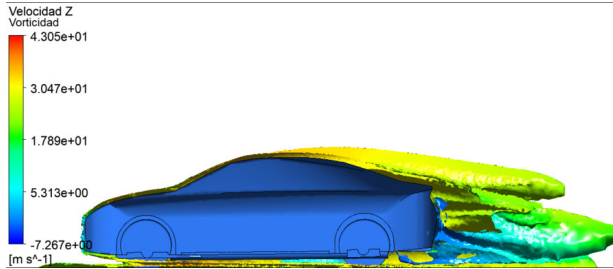
Como se puede apreciar en las imágenes anteriores, el flujo bajo el vehículo se ve considerablemente modificado debido a la presencia de elementos mecánicos, donde sufre una reducción de velocidad, ve sus líneas de flujo alteradas y como se presenta en el contorno de presión, se produce un cambio de presiones al considerar que se tiene mayor variedad de coloración en este contorno.



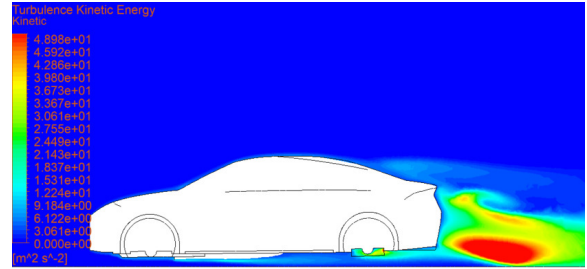
(a) Turbulencias frontales según Q-Criterion



(b) Turbulencias traseras según Q-Criterion



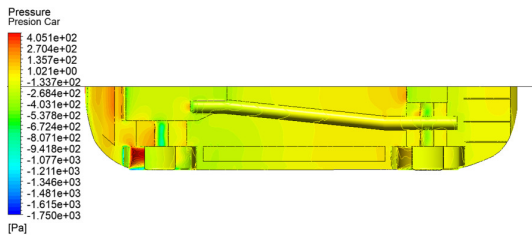
(c) Vorticidad de turbulencias



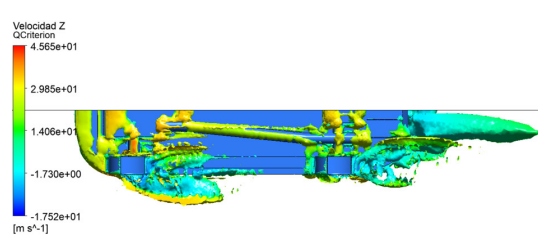
(d) Energía Cinética de turbulencias

Figura E.12: Resultados gráficos del turbulencias vehículo con difusor recto y elementos mecánicos a 100 [km/h]

Adicionalmente, aumenta la presencia de turbulencias bajo el automóvil, lugar donde en los modelos utilizados para el estudio generalmente se ausentaban.



(a) Contorno de presión en la parte inferior



(b) Turbulencias en la parte inferior

Figura E.13: Detalles en la parte inferior a 100 [km/h]