

Diseño mecánico y verificación empírica de un sistema de canalización aerodinámico que mejora la eficiencia energética en automoción

Autora: Jana Fernández Gutiérrez

Tesis doctoral UDC / 2023

Directores: Dr. Diego Vergara Rodríguez

Dr. José Antonio Orosa García

Programa de doctorado en Energía y Propulsión Marina



UNIVERSIDADE DA CORUÑA





Dr. Diego Vergara Rodríguez, Profesor del área de Ingeniería Mecánica de la Universidad Católica de Ávila.

Dr. José Antonio Orosa García, Profesor del área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de A Coruña.

AUTORIZAN:

La presentación para su depósito de la tesis que ha sido realizada por D.^a Jana Fernández Gutiérrez con título “Diseño mecánico y verificación empírica de un sistema de canalización aerodinámica que mejora la eficiencia energética en automoción”.

Y para que así conste, firma esta autorización en A Coruña, a 12 de junio de 2023

Los directores de la tesis

Fdo. Diego Vergara Rodríguez

Fdo. José Antonio Orosa García





*A mi hijo Pablo, queriendo transmitirle la pasión
por la Ingeniería que a mí me ha transmitido mi padre.*





▪ Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi padre por su gran ayuda a lo largo de todo el proceso tanto a nivel técnico como moral y sobre todo por su colaboración y ayuda en la realización de los ensayos experimentales.

Quiero agradecer a mi director de tesis Diego Vergara por guiarme y enseñarme a dar mis primeros pasos en el mundo de la investigación. Asimismo, reconozco la profesionalidad y ayuda de mi director José Antonio Orosa.

También siento la necesidad de agradecer a mi marido, Roberto, el gran apoyo que me ha mostrado durante el largo camino y a mi hijo Pablo de casi 3 años, que la mayoría de las veces no entendía que estuviese con el ordenador y no jugase con él.

Además, me gustaría reconocer la ayuda de mi madre y su aportación dándonos los táperes para que optimizase el tiempo.





“Soñar en grande da el mismo trabajo que soñar en pequeño”

Jorge Paulo Lemann





▪ **Resumo**

O fluxo de aire nos automóbiles xera unha alta resistencia no avance dos vehículos e o obxectivo da presente invención é aproveitar a propia forza do aire para axudar a impulsar os vehículos e reducir así o consumo de combustible. Diseñouse un sistema de canalización aerodinámica, baseado nun deflector que recolle o aire que impacta o vehículo na parte dianteira, trasladándoo á parte traseira onde é expulsado, permitindo encher a zona de baleiro, xa que o aire canalizado alcanza presións máis altas que reposicionan, aumentando significativamente os valores das presións. Construíuse o sistema de canalización, que se incorporou a un modelo de coche e realizáronse probas empíricas comparativas nun túnel de vento construído tamén para tal fin, comprobando que se elimina o baleiro na zona traseira do vehículo e mesmo obter presións positivas, acadando un rendemento do 3,3% a unha velocidade de 76 km/h. Así mesmo, a optimización enerxética verifícase mediante simulacións computacionais de mecánica de fluídos. Ademais, a análise da viabilidade técnica, económica e social é positiva, o que permite concluír que o sistema deflector ideado mellora a aerodinámica dos vehículos e diminúe o consumo de combustible.



▪ **Resumen**

El flujo de aire en automoción genera elevada resistencia en el avance de los vehículos y el objetivo de la presente invención es aprovechar la fuerza del propio aire para ayudar a impulsar los vehículos y así disminuir el consumo de combustible. Se ha diseñado un sistema de canalización aerodinámico, basado en un deflector que recoge el aire que impacta contra el vehículo en la parte frontal, trasladándolo hasta la parte posterior donde es expulsado, permitiendo rellenar la zona de vacío, debido a que el aire canalizado alcanza presiones superiores que se recolocan aumentando significativamente los valores de las presiones. Se ha construido el sistema de canalización, el cual se ha incorporado a una maqueta de coche y se han realizado ensayos empíricos comparativos en un túnel de viento también construido para tal fin, verificándose que en la zona posterior del vehículo se consigue eliminar el vacío e incluso obtener presiones positivas, lográndose un rendimiento del 3,3 % a una velocidad de circulación de 76 km/h. Asimismo, se verifica la optimización energética mediante simulaciones de mecánica de fluidos computacional. Además, el análisis de viabilidad técnica, económica y social es positivo, permitiendo concluir que el sistema deflector ideado mejora la aerodinámica de los vehículos y disminuye el consumo de combustible.



▪ **Abstract**

The airflow in automobiles generates high resistance in the advance of vehicles and the objective of the present invention is to take advantage of the force of the air itself to help propel the vehicles and thus reduce fuel consumption. An aerodynamic channelling system has been designed, based on a deflector that collects the air that impacts the vehicle at the front, transferring it to the rear where it is expelled, allowing the vacuum area to be filled, since the channelled air reaches higher pressures that are repositioned, significantly increasing the values of the pressures. The channelling system has been built, which has been incorporated into a car model and comparative empirical tests have been carried out in a wind tunnel also built for this purpose, verifying that the vacuum is eliminated in the rear area of the vehicle and even obtain positive pressures, achieving a performance of 3.3% at a speed of 76 km/h. Likewise, energy optimization is verified through computational fluid mechanics simulations. In addition, the analysis of technical, economic and social feasibility is positive, allowing us to conclude that the deflector system devised improves the aerodynamics of the vehicles and decreases fuel consumption.



▪ Índice o tabla de contenidos

Contenido

Índice de tablas.....	16
Índice de figuras	17
Lista de abreviaturas	20
1. INTRODUCCIÓN	22
1.1. Estado del Arte	23
1.2. Objetivos	25
1.3. Análisis teórico	28
2. METODOLOGÍA.....	41
2.1. Simulación computacional	41
2.1.1. Diseño del deflector en 3D.....	42
2.1.2. Simulación en software.....	42
2.2. Ensayos empíricos	43
2.2.1. Introducción	43
2.2.2. Diseño y construcción mecánica de la maqueta	44
2.2.3. Diseño y construcción mecánica del sistema de canalización aerodinámico	47
2.2.4. Diseño y construcción del túnel de viento	48
2.2.5. Metrología.....	61
2.2.6. Análisis del túnel de viento	71
2.2.7. Sistema de medición	75
3. RESULTADOS	83
3.1. Simulación computacional	83
3.2. Ensayos empíricos	84
3.2.1. Velocidad de 36 km/h	85
3.2.2. A velocidad de 42 km/h.....	93
3.2.3. Velocidad de 52 km/h	101
3.2.4. Velocidad de 65 km/h	109
3.2.5. Velocidad de 71 km/h	117
3.2.6. Velocidad de 76 km/h	125
3.2.7. Análisis global de todas las velocidades	133
4. DISCUSIÓN.....	140
4.1. Análisis simulación computacional	140
4.2. Análisis ensayos empíricos	141
4.2.1. Análisis eje X.....	142
4.2.2. Análisis eje Y.....	147



4.2.3. Análisis eje Z.....	152
4.3. Cálculo del rendimiento del deflector	156
4.4. Estudio de viabilidad	181
4.4.1. Viabilidad técnica	181
4.4.2. Viabilidad económica	184
4.4.3. Viabilidad social	188
4.5. Investigaciones futuras	190
4.6. Transferencia y repercusión de la investigación	191
4.6.1. Artículo de investigación.....	191
4.6.2. Modelo de utilidad.....	191
5. CONCLUSIONES	192
Referencias	193
Anexos	202



Índice de tablas

Tabla 1.1. Parametrización del régimen de un fluido en función del nº de Reynolds	28
Tabla 1.2. Componentes de la resistencia aerodinámica	32
Tabla 2.1. Tipología túneles de viento.....	48
Tabla 2.2. Porcentaje de participación de cada ventilador en función de la velocidad.....	59
Tabla 2.3. Relación de la velocidad de circulación con la presión	68
Tabla 2.4. Puntos del plano de medición	76
Tabla 3.1. Presiones resultantes sin y con deflector. Comparativa de presiones.....	131
Tabla 4.1. Distancia entre las curvas con y sin deflector en el plano X50.....	142
Tabla 4.2. Coeficiente de resistencia a la rodadura.....	151
Tabla 4.3. Correlación de la denominación de la velocidad con su magnitud	153
Tabla 4.4. Tabla de conversión a 36 km/h	159
Tabla 4.5. Tabla de conversión a 42 km/h	163
Tabla 4.6. Tabla de conversión a 52 km/h	166
Tabla 4.7. Tabla de conversión a 65 km/h	168
Tabla 4.8. Tabla de conversión a 71 km/h	171
Tabla 4.9. Tabla de conversión a 76 km/h	174
Tabla 4.10. Comparativa entre velocidad y rendimiento	175
Tabla 4.11. Comparativa económica a 2 velocidades	181
Tabla 4.12. Análisis económico en función del kilometraje anual	183



Índice de figuras

Figura 1.1. Comportamiento del aire: a) sin deflector; b) con deflector.....	24
Figura 1.2. Efecto del aire: a) sin deflector; b) con deflector.....	25
Figura 1.3. Evolución del aire que impacta en superficie de vehículo según Bernouilli.....	27
Figura 1.4. Régimen laminar y régimen turbulento	28
Figura 1.5. Incidencia del aire en un sólido	29
Figura 1.6. Caracterización de la capa límite.....	29
Figura 1.7. Capa límite	30
Figura 1.9. Componentes fuerza de rozamiento.....	33
Figura 1.10. Valores de C_x en función de la forma geométrica	34
Figura 1.11. Distribución de presiones relativas alrededor de la carrocería	35
Figura 2.1. Fases principales del desarrollo de la investigación	39
Figura 2.2. Diseño en Autocad 3D® vehículo sin deflector	40
Figura 2.3. Diseño en Autocad 3D® del sistema deflector incorporado al vehículo	40
Figura 2.4. Maqueta de vehículo: a) vista delantera; b) vista trasera	43
Figura 2.5. Geometría de la carrocería de una furgoneta	45
Figura 2.6. Deflector: a) vista delantera; b) vista trasera	46
Figura 2.7. Maqueta con deflector: a) vista delantera; b) vista trasera	46
Figura 2.8. Clasificación túneles de viento en función de la cámara de ensayos y retorno.....	49
Figura 2.9. Configuración física seleccionada para el túnel de viento	50
Figura 2.10. Túnel de viento construido en fase VII.I que alcanza 50 km/h	50
Figura 2.11. Elementos constitutivos del túnel de viento Fase VII.I que alcanza 50 km/h	51
Figura 2.12. Estructura del acondicionador de flujo.....	51
Figura 2.13. Acondicionador de flujo incorporado al túnel de viento	52
Figura 2.14. Cono de contracción.....	53
Figura 2.15. Cámara de ensayos.....	53
Figura 2.16. Cono difusor	54
Figura 2.17. Ventilador de succión; a) vista posterior; b) regulador	55
Figura 2.18. Elementos constitutivos del túnel de viento fase VII.II que alcanza 76 km/h	57
Figura 2.19. Ventilador impulsor: a) vista frontal; b) vista lateral	58
Figura 2.20. Tacómetro	60
Figura 2.21. Anemómetro con ventilador PAPST	60
Figura 2.22. Anemómetros con ventilador Brushless	61
Figura 2.23. Relación inducción magnética respecto intensidad de campo magnético	62
Figura 2.24. Polímetro: a) dispositivo; b) visualización de ondas	63
Figura 2.25. Anemómetro digital.....	63
Figura 2.26. Columna de agua.....	64
Figura 2.27. Medición directa con la columna de agua	65
Figura 2.28. Columna de agua conectada al tubo de Pitot.....	65
Figura 2.29. Tubo de Pitot: a) vista completa; b) orificios que miden la presión estática	66
Figura 2.30. Función teórica presión-velocidad dependiente de la T^a	67
Figura 2.31. Función empírica presión-velocidad dependiente de la T^a	68



Figura 2.32. Variador de frecuencia	70
Figura 2.33. Variador de frecuencia: a) esquema del sistema; b) onda generada por el inversor.....	71
Figura 2.34. Categorización túneles de viento	73
Figura 2.35. Maqueta lastrada	74
Figura 2.36. Plano de medición referenciado a los ejes YZ	75
Figura 2.37. Planos de medición referenciados en el eje X	76
Figura 2.38. Posicionamiento del sistema de medición en la fase VII.I	78
Figura 2.39. Posicionamiento del sistema de medición en la fase VII.II	78
Figura 2.40. Referencias de los puntos de medición en la cámara de ensayos	79
Figura 2.41. Marcas de referencia en tubo de Pitot	79
Figura 2.42. Termómetro	80
Figura 2.43. Posicionamiento del termómetro	80
Figura 3.1. Estela de vehículo: a) sin deflector; b) con deflector	81
Figura 3.2. Líneas de flujo con deflector: a) vista lateral; b) perspectiva trasera.....	82
Figura 3.3. Resultados en plano X1 a velocidad 36 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	84
Figura 3.4. Resultados en plano X5 a velocidad 36 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	85
Figura 3.5. Resultados en plano X10 a velocidad 36 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	86
Figura 3.6. Resultados en plano X20 a velocidad 36 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	87
Figura 3.7. Resultados en plano X30 a velocidad 36 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	88
Figura 3.8. Resultados en plano X40 a velocidad 36 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.	89
Figura 3.9. Resultados en plano X50 a velocidad 36 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.	90
Figura 3.10. Resultados en plano X1 a velocidad 42 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.	92
Figura 3.11. Resultados en plano X5 a velocidad 42 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.	93
Figura 3.12. Resultados en plano X10 a velocidad 42 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	94
Figura 3.13. Resultados en plano X20 a velocidad 42 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.	95
Figura 3.14. Resultados en plano X30 a velocidad 42 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	96
Figura 3.15. Resultados en plano X40 a velocidad 42 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	97
Figura 3.16. Resultados en plano X50 a velocidad 42 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	98
Figura 3.17. Resultados en plano X1 a velocidad 52 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	100
Figura 3.18. Resultados en plano X5 a velocidad 52 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	101
Figura 3.19. Resultados en plano X10 a velocidad 52 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	102
Figura 3.20. Resultados en plano X20 a velocidad 52 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	103
Figura 3.21. Resultados en plano X30 a velocidad 52 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	104
Figura 3.22. Resultados en plano X40 a velocidad 52 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	105
Figura 3.23. Resultados en plano X50 a velocidad 52 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	106
Figura 3.24. Resultados en plano X1 a velocidad 65 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	108
Figura 3.25. Resultados en plano X5 a velocidad 65 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	109
Figura 3.26. Resultados en plano X10 a velocidad 65 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	110
Figura 3.27. Resultados en plano X20 a velocidad 65 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	111
Figura 3.28. Resultados en plano X30 a velocidad 65 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	112
Figura 3.29. Resultados en plano X40 a velocidad 65 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	113
Figura 3.30. Resultados en plano X50 a velocidad 65 km/h: a) sin deflector, b) con deflector.....	114
Figura 3.31. Resultados en plano X1 a velocidad 71 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	116



Figura 3.32. Resultados en plano X5 a velocidade 71 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	117
Figura 3.33. Resultados en plano X10 a velocidade 71 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	118
Figura 3.34. Resultados en plano X20 a velocidade 71 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	119
Figura 3.35. Resultados en plano X30 a velocidade 71 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	120
Figura 3.36. Resultados en plano X40 a velocidade 71 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	121
Figura 3.37. Resultados en plano X50 a velocidade 71 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	122
Figura 3.38. Resultados en plano X1 a velocidade 76 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	124
Figura 3.39. Resultados en plano X5 a velocidade 76 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	125
Figura 3.40. Resultados en plano X10 a velocidade 76 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	126
Figura 3.41. Resultados en plano X20 a velocidade 76 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	127
Figura 3.42. Resultados en plano X30 a velocidade 76 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	128
Figura 3.43. Resultados en plano X40 a velocidade 76 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	129
Figura 3.44. Resultados en plano X50 a velocidade 76 km/h: a) sin deflector, b) con deflector	130
Figura 4.1. Estela de vehículo: a) sin deflector; b) con deflector	136
Figura 4.2. Comparativa de presiones con y sin deflector respecto del eje X a distintas velocidades: (a) 36 km/h; (b) 42 km/h; (c) 52 km/h; (d) 65 km/h; (e) 71 km/h y (f) 76 km/h	140
Figura 4.3. Evolución de la diferencia de presión sin y con deflector para cada velocidad	141
Figura 4.4. Distancia entre las curvas con y sin deflector en X50	143
Figura 4.5. Comparativa de presiones con y sin deflector respecto del eje Y a distintas velocidades: a) 36 km/h; b) 42 km/h; c) 52 km/h; d) 65 km/h; e) 71 km/h y f) 76 km/h	145
Figura 4.6. Distancia entre las curvas con y sin deflector de cada coordenada del eje Y en el plano X50	147
Figura 4.7. Comparativa de presiones con y sin deflector respecto del eje Z a distintas velocidades: (a) 36 km/h; (b) 42 km/h; (c) 52 km/h; (d) 65 km/h; (e) 71 km/h y (f) 76 km/h	150
Figura 4.8. Ajuste de líneas de tendencia para 36 km/h	157
Figura 4.9. Ajuste de líneas de tendencia para 42 km/h	161
Figura 4.10. Ajuste de líneas de tendencia para 52 km/h	164
Figura 4.11. Ajuste de líneas de tendencia para 65 km/h	167
Figura 4.12. Ajuste de líneas de tendencia para 71 km/h	170
Figura 4.13. Ajuste de líneas de tendencia para 76 km/h	172
Figura 4.14. Función velocidad-rendimiento	175
Figura 4.15. Anclaje basado en 4 puntos de anclaje	177
Figura 4.16. Barras longitudinales adheridas al techo	178
Figura 4.17. Barras longitudinales elevadas	178
Figura 4.18. Garras abrochables a los extremos laterales del techo	179



Lista de abreviaturas

A_C	Ahorro de combustible a los 100 km
A_{CA}	Ahorro de combustible anual
A_E	Ahorro económico en combustible
A_{EA}	Ahorro económico en combustible anual
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
CFD	Dinámica de fluidos computacional
C.N.	Condiciones Normales
$C_{\alpha/\beta}$	Consumo medio de combustible en vehículo sin y con deflector
C_p	Coefficiente de presión
C_x	Coefficiente de resistencia aerodinámica
D	Ciclo de trabajo
D	Diámetro interno de la tubería
D_R	Distancia recorrida anualmente por un vehículo
E	Fuerza electromotriz inducida
f	Frecuencia
f.e.m.	Fuerza electromotriz
FET	Transistor de efecto campo
F_A	Fuerza por resistencia aerodinámica
F_E	Fuerza de empuje
F_P	Fuerza por resistencia a la pendiente
F_R	Fuerza por resistencia a la rodadura
F_x	Fuerza de arrastre
g	Aceleración de la gravedad
GEI	Gases efecto invernadero
H	Altura sobre el nivel del mar
IGBT	Transistor bipolar de puerta aislada
k	Coefficiente de resistencia a la rodadura o de rozamiento dinámico
km_G	Kilometros equivalentes de ganancia por mejora del sistema deflector
M	Número de Mach
m	Masa
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
N/A	No aplica
N	Fuerza ejercida por el vehículo contra superficie de apoyo
p	Presión medida en columna de agua en Pascales
Pa	Pascales
P_{atm}	Presión atmosférica
P_C	Precio de combustible
PWM	Modulación de ancho de pulso
2p	Número de pares de polos
r	Tiempo en que la función es positiva, ancho del pulso



R	Constante de gas aire
R_{ar}	Resistencia aerodinámica por la presión
R_{ap}	Resistencia debida a la presión
R_{ax}	Resistencia total aerodinámica en una dirección
Re	Número de Reynolds
R_T	Resistencia total aerodinámica
S	Superficie frontal del vehículo afectada
S_E	Superficie de empuje
T	Período de la función
T	Temperatura en grados Kelvin
T_A	Tiempo de amortización
V	Viscosidad cinemática del fluido
v	Velocidad
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure, (Procedimiento de ensayo mundial armonizado para los turismos y los vehículos comerciales ligeros)
α	Condiciones convencionales, sin sistema de canalización aerodinámico
β	Con sistema de canalización aerodinámico incorporado
f	Frecuencia
η	Rendimiento
ρ	Densidad del aire
μ	Viscosidad dinámica del fluido
τ_s	Tensión tangencial
v	Velocidad local de un objeto en movimiento
v_s	Velocidad del sonido
ω	Velocidad angular
Y	Función polinómica de aproximación a curva de velocidades



1. INTRODUCCIÓN

A medida que las emisiones globales se vuelven más preocupantes, las regulaciones sobre gases de efecto invernadero (GEI) y calidad del aire impuestas a los vehículos se vuelven en consecuencia más estrictas [1] para cumplir con los objetivos de emisiones establecidos según pauta el procedimiento europeo de homologación de vehículos WLTP (procedimiento armonizado de ensayo de vehículos ligeros) [2], lo que ayuda a reforzar cuantitativa y cualitativamente la necesidad de combatir el impacto medioambiental.

Asimismo, debido a que el sector de la movilidad es uno de los principales causantes de las emisiones totales de gases de efecto invernadero, se establecen diversos objetivos para disminuirlos en al menos un 55 % para 2030 [3] y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 90 % para 2050, así como conseguir la neutralidad climática con el fin de fortalecer el desarrollo sostenible [4]. De modo que dichos objetivos se enmarcan en el Pacto Verde [5], el mecanismo de la Unión Europea para la transformación del sistema energético [6] y el desarrollo de una economía verde y sostenible mantenida en el tiempo [7].

Además, hay que considerar que, debido a la necesidad creciente de movilidad personal y transporte de mercancías, se estima que la flota automovilística mundial se duplique para el año 2030 alcanzando los 1.600 millones de vehículos [8].

Estos factores han provocado que los fabricantes de automóviles compitan intensamente a nivel mundial en el desarrollo de modelos que precisen menor consumo de recursos energéticos debido al agotamiento de los combustibles fósiles que son la principal fuente de emisión de CO₂ y así poder combatir el consecuente cambio climático [9]. No obstante, los centros de investigación además de priorizar la eficiencia de los vehículos, tienen que buscar el equilibrio con la seguridad que proporcionen los mismos y simultáneamente intentar compaginarlo en la medida de lo posible con diseños sofisticados cada vez más demandados.

Por consiguiente, queda evidenciada la necesidad de establecer nuevas líneas de investigación para reducir el consumo de combustibles por motivos medioambientales y socioeconómicos tanto presentes como futuros, y debido a que uno de los principales problemas del automovilismo es el flujo de aire, ya que la incidencia del mismo sobre los vehículos en circulación provoca elevada resistencia al movimiento, se plantea optimizar la eficiencia de los automóviles y el consumo de energía, optimizando la disminución de la resistencia aerodinámica, la cual influye directamente y además tiene una relación cuadrática con la velocidad de circulación [10].

Cabe destacar la importancia de reducir la resistencia aerodinámica, debido a que beneficia a la totalidad de tipos de propulsión de los vehículos. Asimismo, una menor resistencia proporciona un mejor rendimiento y en consecuencia se requiere menor consumo de energía, lo que permite reducir la emisión de gases de efecto invernadero. Asimismo, aporta una velocidad de circulación máxima más elevada y una estabilidad general superior.

Estos efectos se fundamentan en que la resistencia es una fuerza que tiende a tirar del vehículo hacia atrás, tal que la resistencia a la presión es el factor que más contribuye a la resistencia del vehículo, lo que se debe a una menor presión en la parte trasera en comparación con la parte delantera, ya que cuando el vehículo avanza, el punto de estancamiento se produce en la parte delantera del



vehículo, de modo que, posteriormente, el flujo de aire pasa por encima del vehículo y se separa en la parte trasera debido a un gradiente de presión adverso.

En contraposición, se pone de manifiesto que el aire es una gran fuente de energía en otros sistemas energéticos como la energía eólica, lo que conlleva a plantearse en este estudio la siguiente pregunta ¿se puede mejorar la aerodinámica en automoción aprovechando la fuerza del propio aire para disminuir la resistencia aerodinámica y a su vez ayudar a la impulsión?

1.1. Estado del Arte

La resistencia aerodinámica ha sido objeto de estudio en numerosas investigaciones durante décadas, tanto desde un nivel de optimización numérica [1], como de diseño técnico [11] y desarrollo de algoritmos [12], corroborándose con sistemas de simulación computacional (CFD) y diversas tipologías de túneles de viento a diferentes escalas. No obstante, se requiere fomentar y continuar la investigación en este ámbito para encontrar diversas alternativas que reduzcan la resistencia aerodinámica con la finalidad de alcanzar los objetivos pautados, de modo que la necesidad de mejorar la resistencia aerodinámica continúa siendo un importante reto a corto y a largo plazo.

En el diseño de un vehículo es de vital importancia la forma de la carrocería, ya que influye tanto en el aprovechamiento de la potencia que desarrolla el motor, como en la estabilidad a altas velocidades y en el consumo energético, siendo el estudio aerodinámico sobre el vehículo una potente herramienta para garantizar buenos resultados [13]. Además, la aerodinámica tiene también un importante papel en el confort de los pasajeros puesto que el diseño condiciona las formas de la carrocería, lo que lleva asociado a su vez la ventilación y el ruido aerodinámico en el interior del habitáculo. Por ejemplo, una forma popular en el mercado de vehículos de pasajeros es el sports utility vehicle (SUV), el cual suele estar diseñado con un estrechamiento limitado en los bordes traseros, por motivos estéticos, lo que provoca una gran región de baja presión en la estela y una reducción de la presión en la base, dando como resultado una resistencia aerodinámica mayor que la de otros tipos de vehículos más estrechos [10].

Diversas investigaciones consideran preciso mejorar el diseño de los automóviles con el objetivo de disminuir la resistencia aerodinámica que se genera fundamentalmente en la zona posterior de los vehículos, debido a que precisamente la parte trasera es responsable de aportar el 80 % de la resistencia aerodinámica total [11].

Al ser fundamental conocer el comportamiento del flujo de aire alrededor del vehículo, existen estudios que han realizado investigaciones con el fin de optimizar la forma general [14] y a su vez, incorporar dispositivos de control adecuados. Los coeficientes más relevantes son, por un lado, el coeficiente aerodinámico de arrastre que indica la dificultad de avance que presenta un objeto en un fluido incidiendo en el consumo energético y, por otro lado, el coeficiente de sustentación que cuantifica la carga aerodinámica producida, que influye en la estabilidad, manejo y velocidad máxima [15]. Una metodología de análisis se fundamenta en el cuerpo Ahmed, que consiste en un modelo simplificado de vehículo para representar las características aerodinámicas principales [16], de modo que sobre él se ha estudiado la influencia de uno de los diversos elementos que han sido desarrollados para analizar los parámetros asociados a la resistencia aerodinámica, por ejemplo, el



difusor, que consiste en una leve inclinación en la parte inferior posterior del vehículo [17]. Otro trabajo ha analizado la combinación de un difusor con un generador de vórtice que permite mejorar la reducción de la fuerza de arrastre [18].

Asimismo, existen estudios focalizados en diferentes elementos del vehículo, como el estado de las ruedas [19] y la influencia de las ruedas [20], o el uso de flaps [21], que se pueden instalar en el borde trasero del techo y se logra aumentar el coeficiente de presión de la superficie trasera de la cabina del camión, lo que provoca que el flujo descendente del techo se incline en la puerta trasera, eliminando la unión del flujo de la caja al portón trasero y en consecuencia se disminuye el coeficiente de arrastre [22]. A su vez, se practican diversos tipos de redondeos a la carrocería mayoritariamente en la zona posterior [23], con diversos objetivos como controlar las turbulencias [24], los vórtices [25] y la fuerza de arrastre [26].

En relación a la modificación de superficies, se ha simulado computacionalmente la variación del flujo de aire y, por tanto, el coeficiente aerodinámico al incorporar una superficie irregular cóncava circular en la superficie del panel del techo que permite reducir la resistencia aerodinámica de una furgoneta [27]. De manera similar, se ha experimentado instalando en un mini autobús una placa de superficie no lisa en la parte superior del techo con multitud de bolas colindantes, con el fin de controlar el flujo y consiguiendo mejorar el coeficiente de arrastre [28].

Por otro lado, existen estudios cuyo objetivo es disminuir la resistencia aerodinámica mediante el desarrollo de diferentes modelos de deflectores, los cuales desarrollan métodos pasivos [29] o métodos activos [30] para reducir la resistencia aerodinámica [31], como por ejemplo, un borde de fuga de techo optimizado en forma de chaflán, que reduce el tamaño de la estela aumentando las presiones de base permitiendo reducir la resistencia [32] y también para analizar la influencia de ciertos componentes móviles del vehículo en la resistencia aerodinámica [33].

A su vez, estudios complementarios consideran el efecto de deflectores de aire con generador de torbellino [34] y clapetas regulables [35]. Cabe destacar el tipo de deflector instalable en la superficie trasera de un vehículo, siendo necesario uno en cada lateral de modo que se constituye una multicavidad en dicha superficie trasera, donde cada deflector dispone de una forma preferentemente cuadrada o rectangular, que proporciona una notable mejora en la reducción de la resistencia aerodinámica y es ampliamente utilizado en camiones [36]. Por otro lado, se considera una variante basada en un faldón lateral en forma de cuña con ajuste del ángulo de guiñada, examinándose varias formas de debilitar o eliminar estructuras de flujo para reducir el arrastre base, de modo que se pretende que el flujo se adhiera completamente a la superficie inclinada eliminando la burbuja de separación local [37].

Respecto a la estabilidad del automóvil es sustancial que el centro de presiones, punto donde se concentran todas las fuerzas aerodinámicas, quede lo más próximo posible del centro de gravedad del vehículo, lo cual es difícil de conseguir debido a que a altas velocidades el flujo de aire cambia completamente. Para solucionar dicho problema, algunos coches disponen de sistemas de aerodinámica activa como alerones y spoilers que se despliegan en determinadas situaciones como pueden ser una frenada o al alcanzar determinadas velocidades [38].



Una forma de sacar rendimiento de los efectos aerodinámicos que generan vacío en la parte posterior de los automóviles, es utilizando el concepto de caravana de vehículos, para aprovechar la zona de bajas presiones en la parte trasera por el vehículo siguiente [39], de modo que dicho concepto, podría aplicarse en mayor magnitud con las tecnologías de conducción autónoma y podría incluir pelotones de vehículos organizados [40].

En relación con el concepto de vacío, en un artículo de investigación se reduce el arrastre a bajas velocidades incorporando una bomba de vacío en la parte trasera del vehículo, disminuyendo las pérdidas de forma controlada [41].

El aire es una gran fuente de energía en otros sistemas energéticos como la energía eólica y, de hecho, ya se ha considerado extrapolar el concepto a automoción de manera relativamente similar, instalando una turbina eólica con un generador para producir electricidad mediante un vehículo en circulación [42]. De esta manera, al aunar este concepto de aprovechar la fuerza del aire con el de disminuir la diferencia de presión entre la parte delantera y trasera de un automóvil, que es la principal causa de la resistencia aerodinámica [43], diversos trabajos de investigación han desarrollado el efecto “base bleed” fundamentado en insertar conductos canalizadores de aire que cruzan longitudinalmente todo el vehículo, ubicados dentro del vehículo en la región base [44], y han utilizado esta idea para conseguir reducir la resistencia aerodinámica [45] y aumentar la eficiencia del combustible [46]. Asimismo, otra alternativa que mantiene el concepto de trasladar el aire que impacta en la zona delantera hasta la parte trasera, es canalizar el aire incidente por la parte inferior de los vehículos con el fin de expulsarlo en la parte posterior [47,48].

1.2. Objetivos

El origen de la idea de la presente Tesis Doctoral reside en la observación de cómo los coches se ensucian principalmente en la parte trasera y sobre todo al circular por caminos, ya que permanece el polvo y la arena en toda la superficie posterior, como por ejemplo en la luna posterior. Sin embargo, esta suciedad no se aprecia ni en la parte delantera ni en los laterales de los vehículos, lo que hizo pensar que en la zona posterior se produce un comportamiento diferente, como si se produjese el efecto de una aspiradora que arrastra al aire y a las partículas en suspensión a la zona posterior, lo que sugiere que ese efecto podría actuar como un freno a la circulación de los vehículos.

En esta Tesis se plantea, por lo tanto, aplicar la ciencia aerodinámica al sector de automoción para descubrir cuál es el efecto detectado, el cual se basa en la resistencia aerodinámica.

A consecuencia de realizar un intenso estudio teórico, basado principalmente en fluidomecánica, automovilismo, energía eólica, energía térmica y energía hidráulica, se pensó en la idea de disminuir el problema de la generación de vacío en la zona posterior de los vehículos [49], aprovechando la gran fuerza del propio aire incidente en la parte delantera y reconduciéndolo a dicha zona posterior, para conseguir aumentar la presión de aire, lo que a su vez implica que se logra disminuir la resistencia en el avance de circulación y en consecuencia se reduce el consumo de combustible.



Por consiguiente, un fin inicial es constatar el hecho de dar un giro a la tendencia general de pensamiento de la aerodinámica en automoción, consistente en transformar parcialmente la idea de una desventaja en una ventaja, es decir, aprovechar la fuerza del aire, reconocido como un problema por la resistencia que genera en el desplazamiento de los vehículos. Esta idea se corresponde con el aprovechamiento del aire en otros sistemas energéticos, como la energía eólica.

Por lo tanto, el objetivo fundamental que se pretende cumplir a lo largo del desarrollo de la presente tesis doctoral es mejorar la eficiencia energética en los vehículos, basándose en disminuir el problema ocasionado por el comportamiento del aire en la zona posterior de los vehículos, ya que genera una zona de depresión. Dicha zona de vacío se muestra en la [Figura 1.1a](#) por debajo de la trayectoria de las flechas rojas.

De esta manera, para solventar este problema, se plantea el diseño de un sistema de canalización aerodinámica en la parte superior de los vehículos que permite captar y canalizar el aire incidente en los vehículos, para reconducirlo a la zona posterior. Tal y como se puede observar en la [Figura 1.1b](#) el aire incidente en el vehículo (identificado con flechas de color naranjas) es canalizado y reconducido a la zona posterior (flechas verdes), pretendiendo que se incremente la presión significativamente. Esto permite que se disminuya la resistencia al avance e incluso se favorezca la impulsión del vehículo si se llegan a convertir las presiones iniciales negativas en positivas.

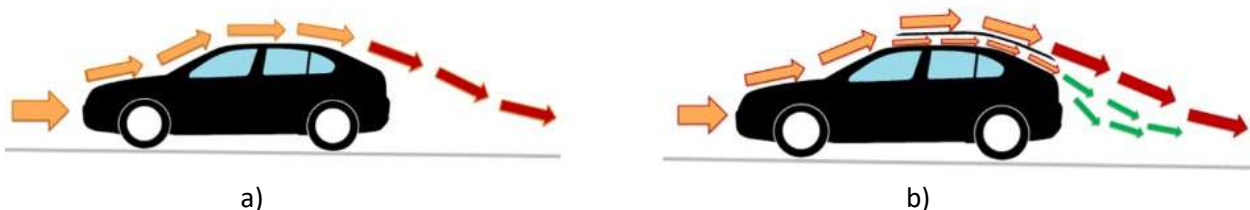


Figura 1.1. Comportamiento del aire: a) sin deflector; b) con deflector.

Por ende, el efecto buscado se ve reflejado en la [Figura 1.2](#) indicándose mediante flechas el sentido del flujo del aire en la parte delante y trasera. De tal manera que en la [Figura 1.2a](#) se representa el vehículo convencional, de modo que al circular el vehículo, en la parte delantera del mismo, incide el aire y genera resistencia en el avance (flechas rojas), no obstante, tal y como se observa en la [Figura 1.2b](#) donde se muestra el vehículo con el sistema deflector en la parte superior, el aire incidente genera el mismo efecto de resistencia al avance en la parte delantera (flechas rojas).

Sin embargo, el objeto de este estudio se focaliza en la parte posterior de los vehículos donde sí se observa una significativa diferencia. En la [Figura 1.2a](#), en el coche convencional, se observan unas flechas rojas hacia la derecha, las cuales representan que la zona de vacío generada implica una elevada resistencia al avance del mismo y actúan como un freno, por lo que las flechas se representan en sentido contrario al de avance. Es como si se colocase una aspiradora detrás del coche que succiona el vehículo en sentido opuesto al necesario para circular.

Por el contrario, en la [Figura 1.2b](#), donde aparece el vehículo con el deflector incorporado, en la zona posterior aparecen unas flechas en sentido contrario, es decir, hacia el vehículo, debido a que el aire recirculado mediante el deflector, permite rellenar la zona de vacío, con lo que se logra eliminar



dichas presiones negativas y su consecuente efecto de succión (frenado), consiguiendo además, que se transformen en presiones positivas, cuyo efecto creado es muy favorable ya que logra impulsar el vehículo.

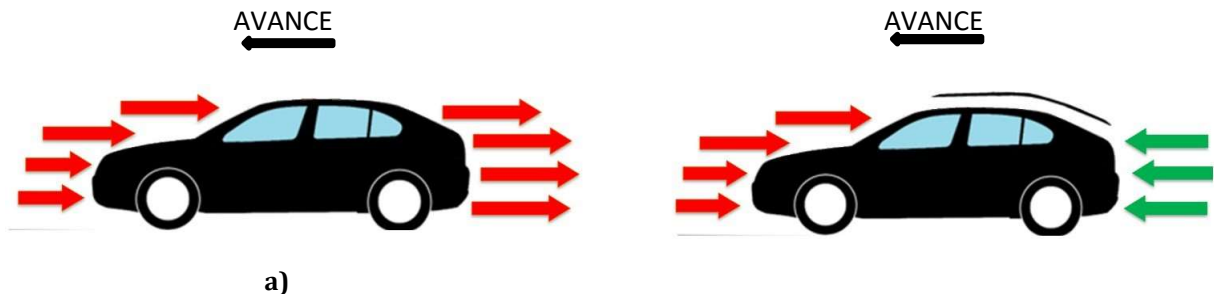


Figura 1.2. Efecto del aire: a) sin deflector; b) con deflector.

A continuación, se plantean los objetivos parciales desglosados en el orden cronológico necesario de consecución para un adecuado desarrollo de la investigación.

- Diseñar un sistema que permita captar el aire que incide en la parte delantera de los vehículos y canalizarlo hacia la parte posterior para aumentar la velocidad del aire en la zona de vacío donde se focaliza gran parte de la fuerza resistiva y así conseguir disminuir el consumo de combustible.
- Modelizar mediante dinámica de fluidos computacional CFD el sistema diseñado para tener unas nociones previas del comportamiento del aire y por tanto, del resultado que se puede obtener.
- Realizar ensayos experimentales para evaluar certeramente la propuesta teórica, lo que a su vez implica diversos hitos:
 - Construir el sistema de canalización aerodinámico ideado a escala para que se pueda incorporar a una maqueta de coche que también es preciso construir.
 - Construir un túnel de viento que permita disponer de las condiciones de flujo de aire necesarias en la cámara de ensayos para hacer las mediciones y comparativas necesarias.
 - Adquirir los equipos de metrología necesarios para analizar los diferentes comportamientos del aire en diversas condiciones.
 - Efectuar ensayos empíricos en diferentes condiciones que permitan evaluar el sistema deflector.
- Interpretar los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos experimentales.
- Cuantificar el rendimiento aportado por el sistema deflector asociado al ahorro de combustible y a su vez en términos económicos.
- Analizar la posibilidad de implantación del nuevo sistema en la industria automovilística y la aceptación por parte de la sociedad.



1.3. Análisis teórico

En este capítulo se presenta un resumen del estudio realizado a nivel teórico sobre aerodinámica aplicada al sector automovilístico, indicando los principios más importantes que caracterizan la aerodinámica en automoción, detallando la importancia aportada por cada uno de ellos para conseguir caracterizar el flujo de aire. Dicho estudio permite complementar la comprensión del comportamiento del aire en el desarrollo de la simulación computacional y de los ensayos experimentales [50].

Inicialmente, es conveniente indicar que la aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que se encarga de estudiar el movimiento relativo entre un sólido y el fluido gaseoso que lo rodea, generalmente el aire, determinando las presiones y fuerzas que se generan. El diseño de cualquier infraestructura y vehículo requiere de un exhaustivo análisis de mecánica de fluidos, siendo clave durante el proceso de diseño [51].

La demanda de vehículos cada vez más rápidos y eficientes para el desplazamiento y el transporte, ha impulsado la necesidad del estudio de las propiedades fundamentales del movimiento en el seno de un fluido y del impacto que los movimientos tienen con respecto al fluido en el que se desplazan.

- **Teorema de Bernouilli**

Es una de las leyes fundamentales que rigen el movimiento de los fluidos y relaciona un aumento en la velocidad de flujo con una disminución de la presión y viceversa. Afirma que la energía mecánica total de un flujo incompresible y no viscoso, es decir, sin rozamiento, es constante a lo largo de una línea de corriente como resultado de la conservación de la energía.

Las líneas de corriente son líneas de flujo imaginarias que siempre son paralelas a la dirección del flujo en cada punto, y en el caso de flujo uniforme coinciden con la trayectoria de las partículas individuales de fluido.

Este teorema se aplica al flujo sobre superficies [52]. En el presente estudio, se aplicaría a la superficie del vehículo afectada por la corriente de aire (Figura 1.3). Un ala, o plano aerodinámico, está diseñada de forma que el aire fluya más rápidamente sobre la superficie superior que sobre la inferior, lo que provoca una disminución de presión en la superficie de arriba con respecto a la de abajo. Esta diferencia de presiones proporciona la fuerza de sustentación que mantiene el avión en vuelo. Los coches de carrera son muy bajos con el fin de que el aire se desplace a gran velocidad por el estrecho espacio entre la carrocería y el suelo, lo que reduce la presión debajo del vehículo y lo aprieta con fuerza hacia abajo para favorecer el agarre. Este sector de coches también lleva en su parte trasera un plano aerodinámico con forma de ala invertida para aumentar la fuerza contra el suelo.

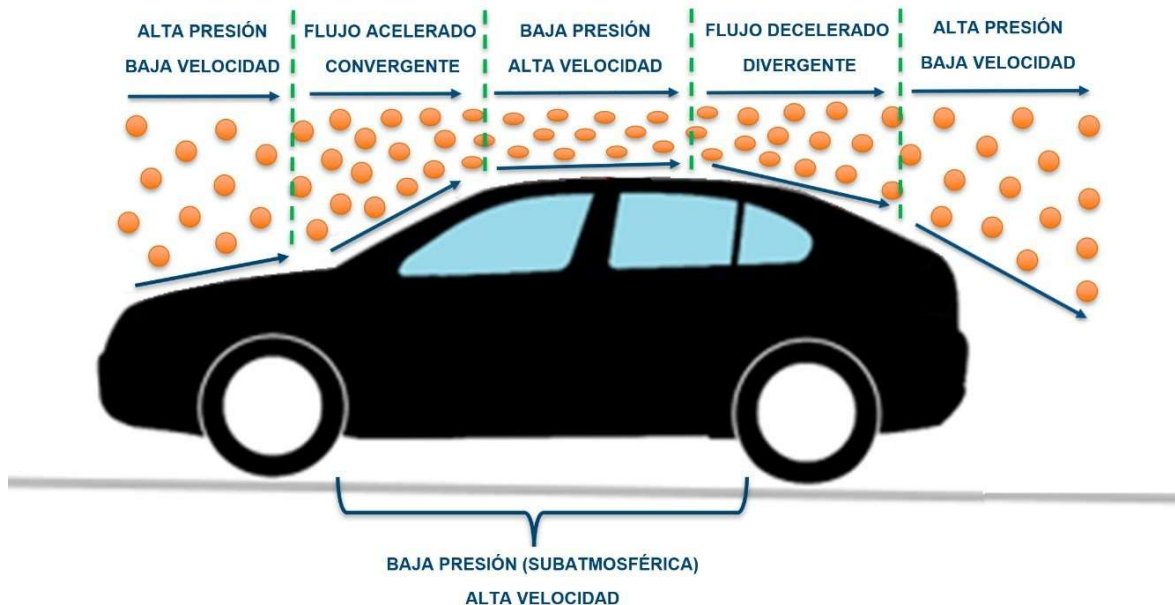


Figura 1.3. Evolución del aire que impacta en superficie de vehículo según Bernoulli. Basada en Heisler, 2002.

Considerando un fluido continuo se obtiene la ecuación de la presión dinámica p :

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

donde ρ es la densidad del fluido (aire) y v la velocidad del fluido.

Esta ecuación es fundamental a la hora de determinar la velocidad del aire en la toma de datos empleando como elemento de medida la columna de agua (apartado de Metrología 2.2.5), ya que permite establecer una relación directa a través del valor medido en la columna de agua con la velocidad en el punto medido.

- **Número de Reynolds**

El número de Reynolds (Re) es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar la naturaleza del movimiento de un fluido, lo que permite comparar modelos a distintas escalas. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} = \frac{D \cdot v}{\nu}$$

donde D es el diámetro interno de la tubería, μ es la viscosidad dinámica del fluido y ν es la viscosidad cinemática del fluido.

Según muestra la [Tabla 1.1](#), dependiendo de la magnitud del número de Reynolds, el flujo de aire se clasifica en laminar para valores inferiores a 2.300 y en flujo turbulento para valores superiores a 4.000. Asimismo, existe un rango intermedio que separa los dos regímenes, denominado flujo transicional, que relaciona los parámetros de la velocidad crítica, la viscosidad y la longitud característica.



Tabla 1.1. Parametrización del régimen de un fluido en función del número de Reynolds.

Número de Reynolds	Régimen del fluido
< 2.300	Laminar
$2300 < Re < 4.000$	Estado transitorio de laminar a turbulento
$Re > 4.000$	Turbulento

Asimismo, en la [Figura 1.4](#) se representa mediante flechas la dirección que toma el flujo de aire en cada posición dependiendo de si se encuentra en régimen laminar o en régimen turbulento. Un flujo sigue un modelo laminar cuando el fluido se mueve en capas o láminas, moviéndose suavemente unas sobre otras y existiendo sólo intercambio de moléculas entre estas capas. Cualquier tendencia hacia la inestabilidad o turbulencia es disminuida por la acción de las fuerzas cortantes viscosas que se oponen al movimiento de estas capas de fluido que se encuentran juntas entre sí.

Por otro lado, un flujo sigue un modelo turbulento cuando el movimiento de las partículas es muy inestable o desordenado y se produce un intercambio entre capa y capa muy intensa o con mayor velocidad que si fuese un flujo laminar.

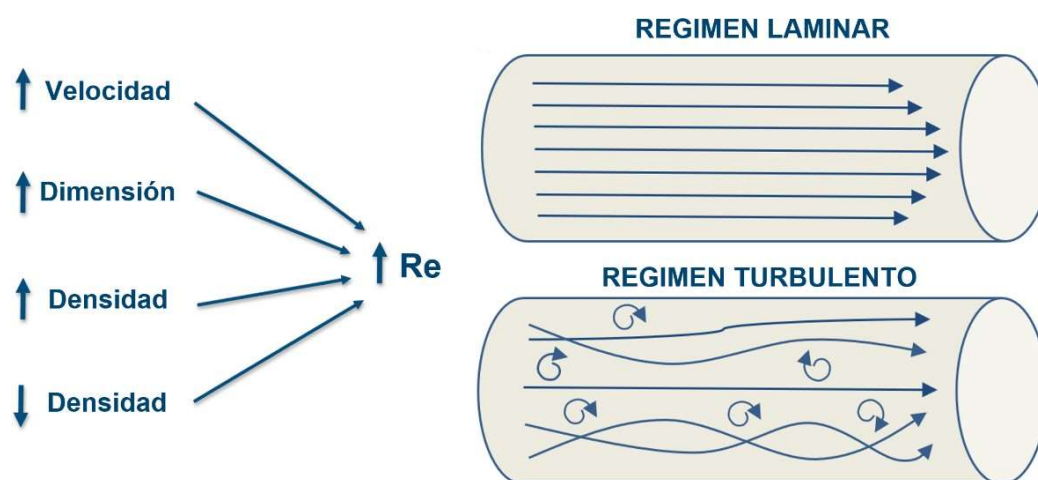


Figura 1.4. Régimen laminar y régimen turbulento.

En la siguiente [Figura 1.5](#) se observa cómo el aire incide en sentido de izquierda a derecha sobre un sólido con forma similar a una gota de agua y en una primera fase el régimen que sigue el flujo de aire es laminar, de tal manera que aproximadamente a la mitad de la superficie pasa por un estado de transición para derivar en un régimen turbulento, donde se aprecia la dispersión y sucesivos cambios de dirección, similares a remolinos.



Figura 1.5. Incidencia del aire en un sólido.

Por tanto, el aire cuando entra en contacto con los diferentes elementos de un vehículo en circulación, puede comportarse principalmente de estas dos formas en función del diseño de cada parte del mismo. De tal manera que, a mayor velocidad, más propenso será el flujo de aire a incrementar su condición de turbulencia.

Por último, indicar que tras diversos ensayos realizados por el científico Reynolds en multitud de condiciones distintas, concluyó que para flujo turbulento, la resistencia que el conducto ofrece al avance de la corriente no es proporcional al cuadrado de la velocidad, sino a la potencia de exponente 1.722 [53]. No obstante, en la presente investigación en el interior de la cámara de ensayos se ha conseguido tener un régimen laminar.

- **Teoría de la capa límite**

El concepto de capa límite nace en 1904 cuando Ludwig Prandtl introduce que el fluido que se mueve y evoluciona alrededor de un sólido puede considerarse ideal en todo el espacio, salvo en una zona próxima al contorno del objeto inmerso en la corriente, donde el rozamiento no puede llegar a despreciarse, ya que es proporcional tanto a la viscosidad como a su vez, al gradiente de velocidades, esquematizado en la siguiente Figura 1.7.

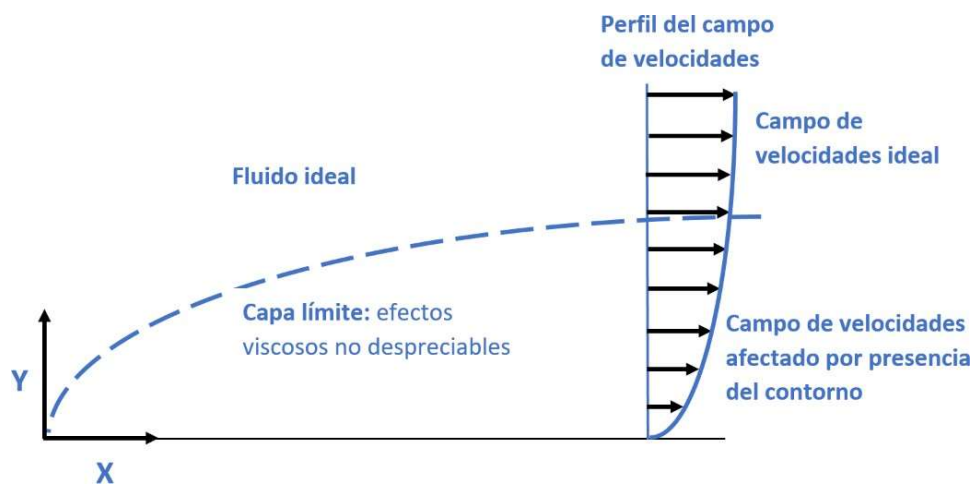


Figura 1.7. Caracterización de la capa límite.



El flujo de aire que incide sobre el automóvil es viscoso, turbulento, tridimensional y presenta importantes vorticidades localizadas que se mueven sobre un contorno fuertemente irregular y con el único atenuante de ser incompresible, características las cuales incrementan la complejidad del problema a tratar. Una vez fuera de la capa límite el fluido se comporta como no viscoso. Al producirse la separación del flujo, como ocurre en la parte posterior del vehículo, la capa límite es destruida y el flujo queda regido por los efectos de la viscosidad [54].

En la siguiente [Figura 1.8](#) se puede observar el esquema bidimensional del flujo exterior sobre la superficie de un vehículo. En ella se comprueba la distribución de velocidades de la capa límite en la parte frontal, así como la destrucción de la capa límite en la parte posterior del vehículo.

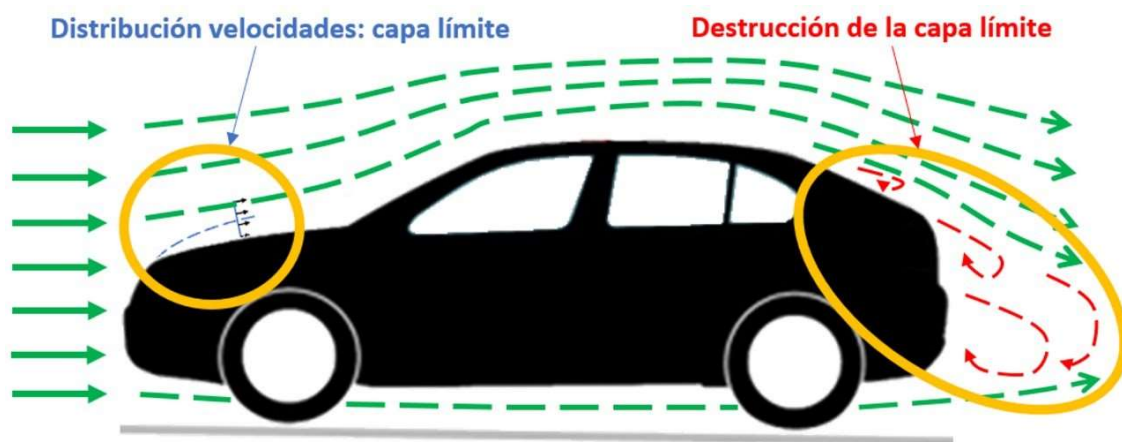


Figura 1.8. Capa límite.

El aire posee viscosidad, es decir, tiene cierto espesor y ofrece resistencia a las deformaciones. Por tanto, cuando circula libre y sin oposición, la velocidad en todos sus puntos es la misma. Sin embargo, al entrar en contacto con una superficie, considerando por ejemplo la carrocería, los neumáticos o cualquier otro elemento del vehículo, se genera fuerza de rozamiento que dificulta el avance del mismo.

Pero dicha resistencia al avance o también denominada *drag*, no es la misma a lo largo de toda la extensión del flujo aerodinámico. Hay que considerar que el aire está formado por múltiples capas: la primera y que entra en contacto directo con la carrocería equipara su velocidad a la del vehículo, mientras que el resto pierde menos velocidad a medida que la distancia con la carrocería es mayor. En términos de velocidad relativa (la diferencia de velocidad entre el aire y la carrocería del coche), la capa que entra en contacto directo con el coche tiende a cero, creciendo a medida que el resto se separa del mismo y hasta que llega un punto en el que su velocidad no se ve afectada [55].

La capa límite es el conjunto de capas (formadas a su vez por moléculas) que ven alterada su velocidad por acción del objeto en cuestión, comenzando por la que iguala su velocidad a la del mismo y finalizando cuando la velocidad del aire no se ve afectada por la resistencia generada.

Por tanto, en aquellos puntos en los que el fluido se “estanca”, como es el caso de los puntos más adelantados del vehículo, la velocidad es nula y la presión alcanza el valor máximo que actúa sobre la superficie del mismo, de modo que $v = 0$ y $p = p_T$ (siendo p_T la presión máxima). Aunque por el contrario, cuando la velocidad alcanza su valor máximo, la presión será mínima.



- **Número de Mach**

Es un parámetro usado en el análisis de flujos compresibles, el cual es la relación de la velocidad local del flujo a la velocidad local del sonido dentro del fluido [56]:

$$M = \frac{v}{v_s}$$

donde v es la velocidad local, velocidad de objeto en movimiento y v_s la velocidad del sonido. El número de Mach es una de las medidas de la importancia que tienen en un flujo determinado, los efectos de la compresibilidad. En el sentido de fuerzas, el número de Mach es la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas originadas por la compresibilidad del fluido. El número de Mach es un término constantemente utilizado para tratar el movimiento de los fluidos sobre objetos.

Mach se usa comúnmente con objetos moviéndose a alta velocidad en un fluido, y en el estudio de fluidos fluyendo rápidamente dentro de túneles de viento. A una temperatura de 15 °C, Mach es igual a 340,3 m/s (1225 km/h) en la atmósfera. El número Mach no es una constante ya que depende de la temperatura.

- **Teorema de semejanzas**

La teoría de las semejanzas se emplea para el trabajo con modelos a escala con el objetivo de que el comportamiento de los mismos sea lo más cercano posible a como se comportaría en una situación real el objeto en cuestión. Manifiesta que los criterios fundamentales para establecer la semejanza de un modelo a escala con el objeto real son los del número de Reynolds y el número de Mach [57].

Para analizar mediante un modelo a escala los fenómenos que podrían ocurrir en el objeto real es necesario que entre ambos (modelo y objeto real) exista semejanza geométrica, cinemática y dinámica, que se consigue al establecer relaciones entre las fuerzas de inercia debidas a la presión, las fuerzas viscosas, las gravitatorias, las elásticas y las tensiones superficiales, determinando una serie de parámetros adimensionales que describen el comportamiento del fluido, en este caso, el aire que incide sobre el vehículo.

- Semejanza geométrica: dos fenómenos son geoméricamente semejantes si todas las correspondientes dimensiones lineales que las caracterizan son proporcionales. Los criterios de semejanza geométrica son relaciones entre cualquiera de las correspondientes dimensiones lineales.

- Semejanza cinemática: dos fenómenos son cinemáticamente semejantes si con la semejanza geométrica, tiene lugar al mismo tiempo, proporcionalidad y orientación igual de los vectores de velocidad en todos los puntos adecuados. Los criterios principales de semejanza cinemática son ángulos que determinan la posición de un cuerpo respecto al vector velocidad de la corriente libre.



○ Semejanza dinámica: dos fenómenos son dinámicamente semejantes si con la semejanza cinemática tiene lugar la proporcionalidad y orientación igual de los vectores fuerzas en todos los puntos. La semejanza dinámica se consigue cuando todas las magnitudes físicas similares son iguales en todos los puntos correspondientes. Esto se consigue logrando la proporcionalidad de las fuerzas de rozamiento y presión lo que simplifica mucho este problema.

- **Resistencia aerodinámica**

El parámetro de la resistencia aerodinámica es la resultante de la fuerza que experimenta un cuerpo en movimiento a través del aire en la dirección de la velocidad relativa entre el mismo aire y el cuerpo propiamente dicho [58]. La resistencia aerodinámica tiene dos causas principales: una debida al rozamiento y otra a causa de la presión. La proporción en que cada una de ellas influye en la global, depende de la forma del cuerpo y del estado de alisamiento de sus superficies.

Cabe destacar que no existen modelos teóricos precisos para predecir la resistencia aerodinámica, por lo que los resultados experimentales constituyen la fuente más fiable de datos y conocimientos sobre la influencia de diferentes variables geométricas, o de otra naturaleza, sobre los distintos coeficientes aerodinámicos.

Además, hay que considerar la resistencia debida a los distintos salientes del coche, entre ellos los espejos retrovisores exteriores, denominada resistencia de densidad. Aunque la contribución de las diferentes resistencias a la resistencia total R_T varía de unos vehículos a otros, algunos valores orientativos se muestran en la [Tabla 1.2](#).

Tabla 1.2. Componentes de la resistencia aerodinámica.

Tipo de resistencia	% Contribución a la R_T
Resistencia de presión o de forma	> 70%
Resistencia de rozamiento o viscosa	< 10%
Resistencia de densidad	> 10%
Resistencia interna	≈ 10%

Para minimizar la resistencia de rozamiento y la resistencia de densidad se recurre al alisamiento de las superficies y la eliminación de protuberancias mientras que la resistencia interna se reduce mediante la adecuada disposición de las superficies de entrada y salida de aire en el habitáculo del vehículo. Por último, la resistencia de presión, al ser la componente que más contribuye a la resistencia total, es a la que más atención hay que prestar para lograr su reducción.

A continuación, se detalla la influencia de las resistencias de rozamiento y presión en la resistencia aerodinámica global.



- **Resistencia debida al rozamiento**

Uno de los efectos de la viscosidad es el rozamiento entre fluido y superficie, el cual es responsable de una tensión tangencial τ_s , la cual produce fuerzas que, al ser integradas, representan una primera componente de los esfuerzos que ejerce el fluido sobre el cuerpo en la dirección del movimiento relativo entre ambos.

Al sumarse todas las fuerzas de rozamiento que actúan en los diferentes elementos de superficie, se obtiene como resultante una fuerza neta total de rozamiento aplicada en el centro de presiones del vehículo. Si dicha fuerza neta se descompone en dos direcciones, en la dirección de movimiento del fluido se obtendrá una fuerza de arrastre F_x [59], opuesta al desplazamiento del vehículo (Figura 1.11). La resultante en la dirección normal suele ser despreciable, pues si el vehículo presenta cierta simetría las fuerzas de un punto suelen compensarse con las del punto opuesto.

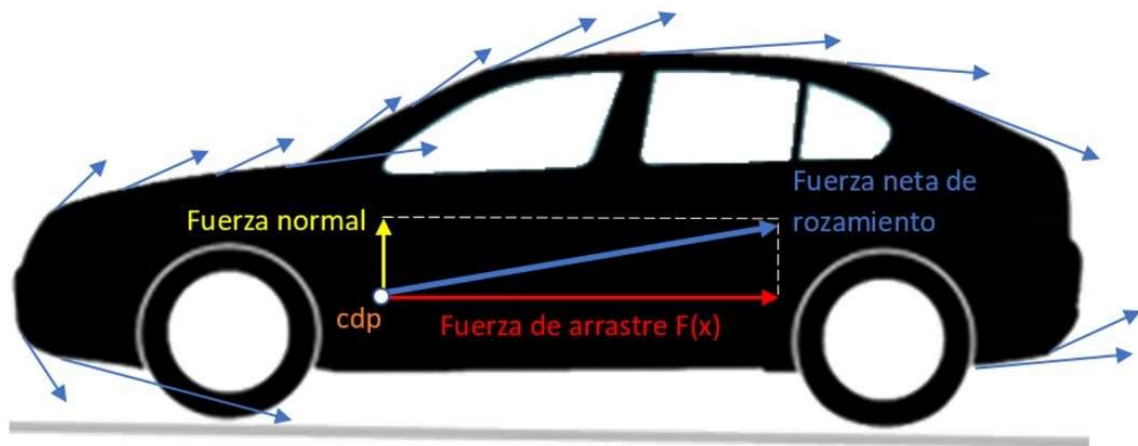


Figura 1.11. Componentes fuerza de rozamiento.

El coeficiente de resistencia aerodinámico C_x refleja la influencia de la forma de una carrocería sobre la potencia absorbida para vencer la resistencia del aire, lo que equivale a que representa la efectividad de la forma de un cuerpo para el desplazamiento a través del aire, carrocería. Cuanto más elevado tenga el coeficiente de resistencia aerodinámico un automóvil, mayor resistencia aerodinámica obtendrá [60].

El coeficiente de resistencia aerodinámico no se mantiene constante durante la marcha, pues, a causa de los cambios de posición y a fenómenos de sustentación, la sección frontal y el perfil se modifican ligeramente. No obstante, a cada carrocería se le asocia un valor determinado C_x que se determina mediante pruebas efectuadas en el túnel aerodinámico con prototipos y modelos reducidos a escala.

Un criterio de diseño de los vehículos automóviles es conseguir que C_x sea lo más independiente posible del número de Reynolds, y para ello es necesario lograr que la separación del flujo se produzca en ciertos puntos para cualquier condición. Por delante de estos puntos el diseño tiene como objetivo la unión del flujo a la superficie, siendo necesario para ello que la presión sea lo más alta posible para las diferentes condiciones del flujo libre.



Cabe destacar que la forma de la parte delantera del cuerpo tiene mucha menos influencia en la resistencia aerodinámica que la forma de la parte trasera, y ello se debe a la gran influencia que ejerce la resistencia de presión frente a la de rozamiento en el valor final de la resistencia aerodinámica.

Se comprueba que el diseño óptimo para vencer la oposición que presenta el aire al avance de los vehículos, ofreciendo por tanto, un menor valor del coeficiente C_x , es la forma de gota. Estos cuerpos son denominados sólidos currentilíneos, y se caracterizan por presentar un valor mínimo de la resistencia aerodinámica al avance, debido a que son cuerpos que intentan alinear su forma con las líneas de corriente del flujo. El diseño de estos cuerpos permite a las líneas de corriente adaptarse al contorno del cuerpo, lo cual ayuda a evitar los despegues de la capa límite en la parte posterior del mismo, provocando así una disminución del valor de la resistencia aerodinámica. Asimismo, en la [Figura 1.12](#) se observan diversas formas geométricas con su correspondiente coeficiente C_x asociado.









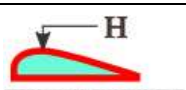
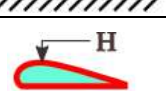
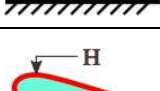
Geometría	Representación	Coficiente de arrastre frontal C_x
Esfera		0,47
Semiesfera		0,42
Cono		0,5
Cubo		1,05
Cubo inclinado		0,8
Cilindro largo		0,82
Cuerpo ahusado $L/D=2,5$		0,04
Semicuerpo ahusado $L/H=5$ en el suelo		0,09
Semicuerpo ahusado $L/H=5$ elevado del suelo		0,13
Semicuerpo ahusado $L/H=5$ elevado del suelo frontal redondeado		0,09
Semicuerpo ahusado $L/H=5$ elevado del suelo frontal redondeado y ruedas		0,15

Figura 1.12. Valores de C_x en función de la forma geométrica.



- **Resistencia debida a la presión**

Cuando un cuerpo se encuentra en el seno de fluido existiendo movimiento relativo de uno respecto al otro, se produce con frecuencia un incremento de presión hacia la parte posterior de dicho cuerpo, procedente del flujo exterior no viscoso. Dicho incremento de presión puede producir separaciones. Según las condiciones en que dichas separaciones se producen respecto al caso ideal del flujo no viscoso, el flujo resultante es diferente.

La distribución de presiones viene impuesta por el flujo exterior y los regímenes laminar y turbulento en la capa límite, dependiendo directamente de dicha distribución. Al aumentar la presión en la dirección del flujo, la fuerza de rozamiento entre la superficie y el fluido aumenta, retrasándose el flujo tanto más intensamente cuanto mayor sea su proximidad a la superficie. En estas condiciones puede llegar a producirse una inversión en el flujo, conociéndose este fenómeno con el nombre de separación. La tendencia a la separación aumenta a medida que se incrementa la presión en la dirección del flujo [61].

La forma más sencilla de determinar el reparto de presiones que actúan sobre el vehículo es considerar la presión estática alrededor del mismo. La [Figura 1.13](#) muestra la distribución de presiones relativas a lo largo del contorno del automóvil, de modo que el valor de la presión se expresa en función de la presión atmosférica, siendo positiva si es mayor, o negativa si es menor.

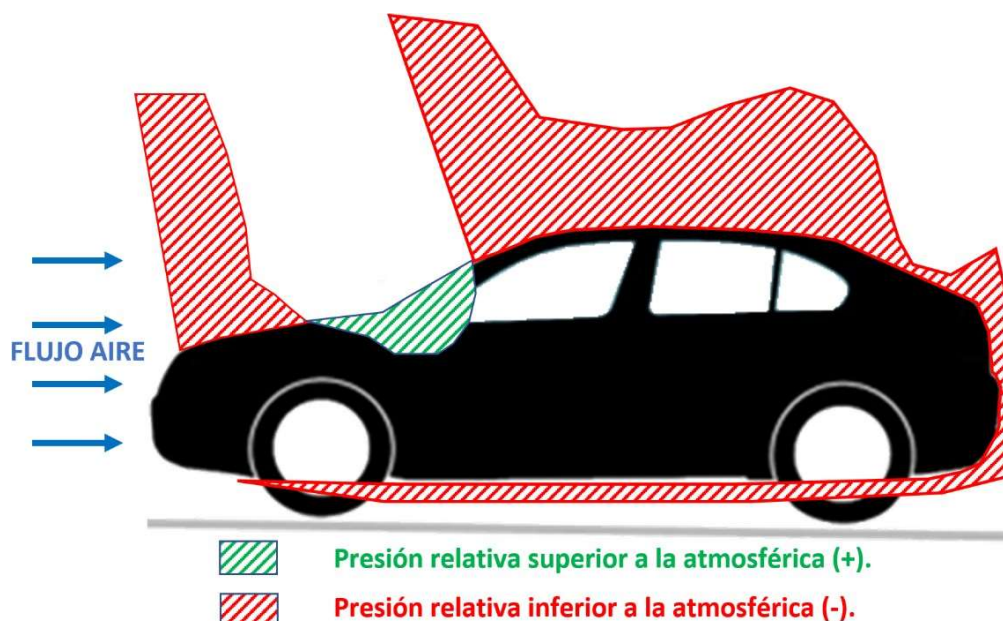


Figura 1.13. Distribución de presiones relativas alrededor de la carrocería.

Se observa que en la parte frontal la presión relativa es negativa, favoreciendo el levantamiento del vehículo y el giro del mismo. A medida que el flujo recorre la superficie del automóvil, se observa que próximo a la base del parabrisas y del capó el flujo ha de cambiar su rumbo hacia arriba provocando una gran presión en esta zona, lo que provocará una disminución de la velocidad del aire, cumpliéndose así el Teorema de Bernouilli. Debido a estas bajas velocidades, dicha zona se convierte en un área estable e ideal para la ubicación de los limpiaparabrisas. Una vez alcanzada la línea del techo la presión vuelve a ser negativa, puesto que el flujo de aire intenta adaptarse al contorno del



vehículo. Esta zona de bajas presiones se mantiene hasta la parte trasera del vehículo y continúa siéndolo en la zona del maletero, siendo en esta última donde existe mayor probabilidad de separación del flujo, ya que el fluido no es capaz de hacer un cambio tan drástico de dirección [62].

Cabe destacar que el diseño aerodinámico de los ángulos y los detalles del contorno de la carrocería en esta parte del vehículo revisten una atención especial ya que debido a las bajas presiones, el flujo que atraviesa el vehículo por los laterales intentará acelerar el aire en la región trasera del maletero y potenciará la separación. Hay que tener en cuenta que al formarse una capa límite turbulenta las separaciones en la parte trasera se retrasan quedando menor superficie expuesta a depresión. La elección de la longitud del techo y de los ángulos que forman la parte trasera del vehículo tiene un impacto directo sobre las fuerzas aerodinámicas puesto que determina el punto de separación de la capa límite. Dicha separación debe ocurrir siempre en el mismo punto, intentando abarcar un área de contacto flujo-vehículo lo más pequeña posible, ya que ello implica menor arrastre.

Al sumarse todas las fuerzas de presión que actúan sobre los diferentes elementos de superficie se obtiene, como resultante, una fuerza neta total que estará aplicada nuevamente en el centro de presiones. Si se establece la dirección de movimiento del fluido o automóvil y esa fuerza neta se descompone en 2 componentes, en la dirección de dicho movimiento y en su perpendicular, se obtendrá que la primera de esas componentes, llamada fuerza de arrastre se opone al avance del vehículo y la segunda, denominada fuerza de adherencia o sustentación, es la responsable de la tendencia a la adherencia o a la separación del vehículo respecto del suelo.

Dada la complejidad de los efectos del aire sobre el vehículo y con la finalidad de facilitar su estudio, se hacen depender todas las relaciones de una única variable, el coeficiente de presión C_p que permita, de forma sencilla, conocer los efectos que surgen a lo largo del estudio aerodinámico. Normalmente el valor de dicho coeficiente C_p se determina de forma experimental en un entorno controlado, como un túnel de viento en el que sea posible conocer la velocidad, la densidad del aire y el área de referencia.

También es posible determinarlo de forma teórica, mediante programas de simulación mediante las ecuaciones de la mecánica de fluidos que permitan optimizar el diseño de los automóviles desde el punto de vista aerodinámico, como herramienta complementaria a los túneles de viento. Así pues, la suma de la resistencia aerodinámica debida al rozamiento R_{ar} y la debida a la presión R_{ap} , constituye la resistencia aerodinámica total en una dirección X, R_{ax} , siendo su expresión:

$$R_{ax} = R_{ap} + R_{ar}$$

Por tanto, la resistencia aerodinámica se relaciona con la resistencia debida al rozamiento y la resistencia de presión, de modo que la proporción en que cada una de ellas influye en la resistencia global depende de la forma del cuerpo y de lo lisas que sean sus superficies. Por ejemplo, en un cuerpo currentilíneo con $C_x = 0,04 - 0,05$ la resistencia aerodinámica es debida, principalmente, al rozamiento.

En cambio, en una placa plana con un coeficiente $C_x = 1,2$ la resistencia es casi puramente de presión, mientras que en formas como cilindros o paralelepípedos con sus ejes longitudinales orientados en la dirección del flujo, la contribución de la resistencia de presión es algo menor que en la placa, pero es predominante.



- **Resistencia debida al flujo interior**

La resistencia aerodinámica además de depender del flujo exterior del vehículo (resistencia debida a la presión y rozamiento), depende del flujo interior, el cual circula por el compartimento motor para refrigerar los órganos sometidos a fuentes de calor, así como por la ventilación, calefacción y aire acondicionado.

La contribución del flujo interior a la resistencia aerodinámica al avance global tiene que ser la menor posible, lo que implica que las exigencias impuestas al sistema de refrigeración y la aerodinámica interna sean cada vez más exigentes, de modo que la necesidad de optimización de los flujos no sólo se refiere a obtener los más altos rendimientos en las funciones específicas que los originan, sino que es necesario reducir en la medida de lo posible su contribución a la resistencia aerodinámica al avance global [63].

Generalmente el flujo interior no puede considerarse dividido en regiones viscosas y no viscosas ya que la proximidad de las superficies provoca prácticamente el solapamiento de las capas límite, haciendo que el flujo se comporte casi en toda su totalidad como un fluido viscoso, caracterizado por el número de Reynolds.

Al estar relacionados los flujos interior y exterior en un vehículo, se debe tener en cuenta que la diferencia de presiones exteriores (en las entradas y salidas de aire del flujo interior) debe ser igual a la suma de todas las pérdidas de presión en los diferentes elementos exteriores por los que circula el aire.

Por tanto, la velocidad del flujo depende de la velocidad del aire, lo que dificulta un diseño adecuado a cada velocidad, en especial debido a la disminución de flujo a velocidades reducidas, lo que conlleva a la implantación de sistemas de bombeo en los sistemas de refrigeración y ventilación. Dichos sistemas han de ser reducidos para minimizar la potencia necesaria y para reducir las interferencias con el flujo exterior.

- **Ruido**

Se originan separaciones periódicas de flujo de aire ocasionadas por cualquier elemento de la carrocería que forme salientes o protuberancias, los cuales forman una calle de vórtices [64], llamada de Karman, corriente abajo desde el elemento perturbador creando una zona inestable de flujo.

Si la frecuencia de los vórtices se sitúa dentro del campo audible, las fluctuaciones de presión dentro del campo de flujo inestable se manifiestan en forma de ruido. La reducción del mismo se consigue o bien eliminando los elementos que provocan las separaciones o bien actuando sobre el flujo, es decir, eliminando el carácter periódico o modificando la frecuencia.

- **Efecto aeroelástico**

La presión elástica produce deformaciones elásticas sobre los elementos elásticos del vehículo, que influyen en las formas aerodinámicas [65]. Como consecuencia surgen dos problemas:



- Problema estático: supone la deformación de ciertos elementos hasta alcanzar el equilibrio con las fuerzas de presión para cada velocidad, aunque no presenta gran importancia.

- Problema dinámico: La vibración de ciertos elementos a determinadas frecuencias induce una oscilación periódica aerodinámica, de la misma frecuencia, en el fluido circundante. Ello puede provocar autoexcitación, de tal manera que el amortiguamiento interno del sistema elástico puede no ser suficiente para mantener la estabilidad, con lo que se originan oscilaciones de gran amplitud, lo cual supone un problema con alternativas complejas.

- **Transporte de partículas**

El arrastre de partículas, bien sean líquidas o sólidas, en el flujo exterior y su trayectoria respecto al vehículo, influyen tanto en el ensuciado del vehículo, con los consiguientes problemas de seguridad, como en la proyección de dichas partículas hacia los vehículos que circulan detrás.

Generalmente la trayectoria de las partículas y las líneas de corriente no coinciden, no existiendo por el momento modelos adecuados para el cálculo de las trayectorias de las partículas, por lo que es necesaria la realización de investigaciones experimentales para definir las. De ello se deduce que la acumulación de suciedad en la superficie del vehículo se debe al hecho de que las partículas no pueden seguir las líneas de corriente, sobre todo en las zonas donde éstas presentan mayor curvatura ya que la trayectoria de las partículas suele presentar una curvatura mínima hasta su impacto con el vehículo. Estos efectos se intensifican en las zonas de cambio de inclinación, como es la zona comprendida entre el capó y el parabrisas, así como la parte trasera, debido al flujo en forma de vórtices [43].



2. METODOLOGÍA

La optimización aerodinámica en los vehículos del sector de automoción que se ha desarrollado en la presente tesis doctoral, se ha realizado en primer lugar a nivel teórico, investigando y analizando numerosa información asociada y con el pensamiento permanente de intentar buscar una mejora aerodinámica. Una vez que se descubrió una posible alternativa tras un análisis teórico inicial, posteriormente se realizó una simulación de dinámica de fluidos computacional, CFD, y finalmente llevó a cabo una investigación experimental para cuantificar la viabilidad del diseño [66].

Asimismo, a continuación se indican las nueve fases principales en las que se ha desarrollado la totalidad del proceso de investigación, según se refleja en la [Figura 2.1](#):

- (i) Fase I: estudio de aerodinámica centrado en buscar mejorar la aerodinámica en el problema de vacío de la zona posterior de los vehículos;
- (ii) Fase II: idear el concepto de aprovechar la fuerza del aire incidente para trasladarlo a la zona posterior con el objetivo de que se rellene el vacío con las presiones positivas;
- (iii) Fase III: estudio de la forma del sistema de canalización aerodinámico;
- (iv) Fase IV: análisis de viabilidad básico;
- (v) Fase V: diseño del sistema de canalización en 3D, así como representación de un vehículo en 3D al cual se puede incorporar;
- (vi) Fase VI: simulación computacional;
- (vii) Fase VII: ensayos empíricos;
- (viii) Fase VIII: análisis de resultados;
- (ix) Fase IX: estudio de viabilidad más completo.

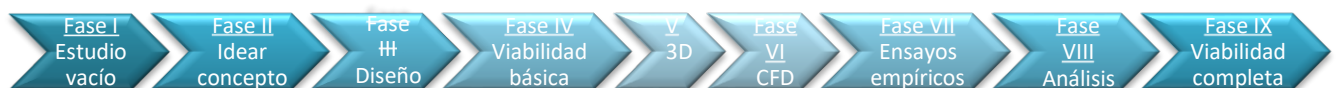


Figura 2.1. Fases principales del desarrollo de la investigación.

A continuación, se profundiza la explicación de los dos métodos fundamentales utilizados para analizar y optimizar el sistema de canalización aerodinámico ideado, basado en un deflector situado en la parte superior de los vehículos. Por un lado, se muestra el método de simulación computacional y por otro lado, se va a explicar detalladamente el proceso completo llevado a cabo para la realización de los ensayos experimentales, junto con el análisis de los datos obtenidos [67].

2.1. Simulación computacional

Inicialmente se realiza una simulación de dinámica de fluidos computacional CFD (*computational fluid dynamics*), asociada a la Fase VI, con el objetivo de examinar *a priori* la funcionalidad del sistema de canalización aerodinámico, debido a que es una metodología que no implica recursos económicos si se utiliza una versión didáctica y permite simular la incidencia del viento, así como el comportamiento del aire alrededor de toda la superficie de los vehículos, ya que facilita la



observación de la dirección del flujo de aire en cada posición. Además, se pueden parametrizar las condiciones del aire incidente y simular a distintas velocidades. Este método comprende la fase inicial de diseño del deflector en 3D y de la maqueta sobre la que se incorpora, así como el análisis de los resultados obtenidos de la simulación aerodinámica computacional mediante un software.

2.1.1. Diseño del deflector en 3D

En la fase de diseño del deflector en software 3D (Fase V, [Figura 2.1](#)) se ha diseñado en Autocad 3D® el sistema de canalización superior fundamentado en un deflector superior. A su vez, se ha modelizado tridimensionalmente en el mismo software un vehículo considerado como modelo ([Figura 2.2](#)) y en paralelo, al modelo de vehículo se le incorpora el sistema deflector ([Figura 2.3](#)). El sistema de canalización se ha diseñado con dimensiones proporcionales al vehículo modelo.

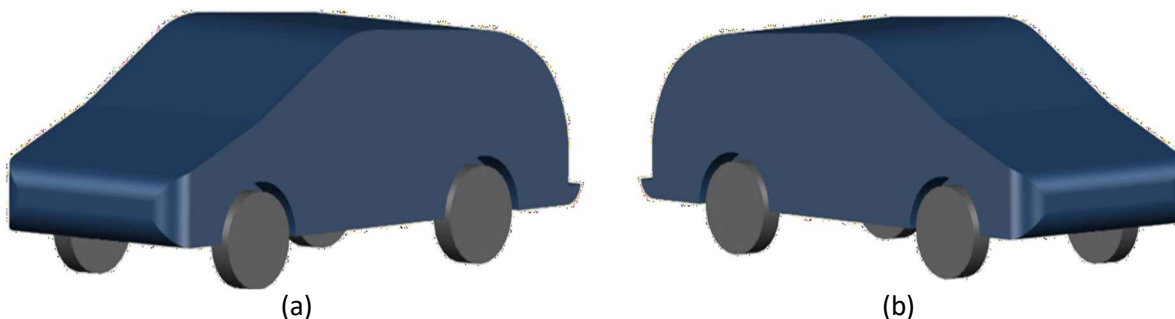


Figura 2.2. Diseño en Autocad 3D® vehículo sin deflector.



Figura 2.3. Diseño en Autocad 3D® del sistema deflector incorporado al vehículo.

2.1.2. Simulación en software

En la fase de simulaciones aerodinámicas (Fase VI, [Figura 2.1](#)), se ha utilizado el software Autodesk Flow Design®, en el que se ha introducido el diseño tridimensional de maqueta y deflector (Fase V, [Figura 2.1](#)) para prever y analizar el comportamiento del aire, sometiendo a las mismas condiciones aerodinámicas al vehículo sin deflector ([Figura 2.2](#)) y posteriormente, al vehículo portando el deflector ([Figura 2.3](#)), con el objetivo de realizar comparativas entre ambas circunstancias que permitan analizar las diferencias en el comportamiento del flujo de aire entre el vehículo convencional y el vehículo con el sistema de canalización aerodinámico incorporado.



2.2. Ensayos empíricos

2.2.1. Introducción

En segundo lugar, se han realizado diversos ensayos experimentales (Fase VII) extrapolando la teoría a la práctica, promovido por un lado, por los favorables resultados obtenidos en la fase previa de simulación computacional. Por otro lado, el motivo fundamental para decidir dar el salto a analizar empíricamente el sistema de canalización aerodinámico ideado, se basa en que las ecuaciones que rigen la Mecánica de Fluidos, en ciertas circunstancias nuevas con interés de investigar comportamientos desconocidos, son insuficientes o inexistentes, lo que obliga a que la aerodinámica automovilística sea una ciencia predominantemente experimental.

Los ensayos empíricos tienen la ventaja respecto de los estudios teóricos, de aportar resultados más fidedignos y por tanto, más relevantes, al analizar en circunstancias reales el comportamiento del aire [68]. Adicionalmente, indicar que las simulaciones computacionales disponen de software que cada vez ofrecen resultados más fieles a la realidad, gracias a la constante evolución de su tecnología, sin embargo, ante la situación de requerir investigar parámetros aerodinámicos en nuevas condiciones nunca antes estudiadas, es preferible realizar mediciones empíricas en un contexto real o al menos a escala reducida, ya que los resultados son más próximos a la realidad [69]. Además, cabe recordar a modo de resumen, la frase “el papel lo aguanta todo” debido a que en la realidad surgen muchos problemas de distintas magnitudes que posiblemente en el desarrollo teórico pueden carecer de importancia o directamente pueden llegar a pasar totalmente desapercibidos. Por ello, numerosos estudios analizan variables aerodinámicas mediante ensayos empíricos, tales como el coeficiente de arrastre [70], los vórtices [71], la turbulencia [72], la capa límite o la estabilidad [73], la evaluación de la vida a la fatiga [74,75] y la mejora de la estabilidad lateral [76], aunque paralelamente lo contrasten con CFD.

Sin embargo, la práctica tiene el inconveniente del coste asociado que implican los numerosos equipos que son necesarios y el tiempo que conllevan los diversos ensayos, así como la incertidumbre asociada a la búsqueda continua de soluciones para llevar a cabo los nuevos procedimientos a lo largo de todo el proceso.

Para ensayar empíricamente el desarrollo aerodinámico automovilístico presentado existen fundamentalmente dos posibilidades: (i) construir el sistema deflector en escala 1:1 e instalarlo en un automóvil real, para hacer las pruebas pertinentes en movimiento en circulación en carretera, pero al implicar una modificación del vehículo y además de modo muy visible, no está permitido según el código de circulación vial vigente [77], por lo tanto, queda directamente descartada esta alternativa; (ii) mediante túnel de viento, que permite estudiar los efectos del movimiento del aire alrededor del objeto sólido simulando las condiciones que experimenta el vehículo en una situación real en circulación, permaneciendo el automóvil en estado estacionario mientras se propulsa el paso de aire alrededor de él, constituyéndose esta opción como la más factible.

No obstante, las factorías automovilísticas utilizan túneles aerodinámicos de dimensiones que permiten analizar un vehículo a escala 1:1, para lo que se requiere un diámetro de la cámara de ensayos de aproximadamente 10 m y en consonancia, ventiladores de muy elevada potencia en



torno a 3 MW, sendo estas instalacións inaccesibles para o desenvolvemento da investigación presente, xa que en moitas ocasións os centros de investigación non autorizan o acceso a los mesmos, y aunque algunos permitan su utilización, los costes de alquiler son inasumibles.

Sin embargo, sí se ha podido disponer de los elementos necesarios para construir un túnel de viento propio que suministre una velocidad máxima de 76 km/h en régimen laminar en una cámara de ensayos de 35 x 45 x 100 cm, cuyo valor de velocidad se considera adecuado para las dimensiones de todos los elementos asociados para la presente investigación y se justifica en el apartado 2.2.4 referente al diseño y construcción del túnel de viento.

Debido a que existe error e incertidumbre en casi la totalidad de los diversos ensayos experimentales llevados a cabo por la industria automovilística, siendo los únicos realmente certeros los realizados con automóviles reales a escala 1:1 en carretera, los ensayos empíricos y los consecuentes resultados obtenidos, se plantean como análisis y observaciones del comportamiento y evolución del aire en diversas condiciones que podrían optimizarse en posteriores investigaciones al respecto para continuar en el proceso de implementación de la idea aportada del sistema de canalización aerodinámico.

A continuación, se explica el proceso que se ha seguido en la Fase VII de ensayos experimentales (Figura 2.1) para la realización de la presente investigación, junto con los subprocesos necesarios más relevantes. Cabe destacar como premisa, que se sometió a la maqueta con y sin deflector a diferentes condiciones de flujo de aire en la realización de diversos ensayos experimentales. El objetivo es medir la presión en la parte trasera de la maqueta del vehículo, debido a que es la zona más afectada por el sistema de canalización aerodinámico e interesa analizar en dicha zona los valores de las variaciones de presión.

Asimismo, indicar que la totalidad de equipos, materiales e instrumentos utilizados en los ensayos empíricos, se han adquirido con recursos propios de la autora de la presente tesis doctoral, Jana Fernández.

Además, es preciso mencionar que para la realización de los ensayos y de las pruebas experimentales ha sido necesario estudiar e interpretar previamente los ensayos aerodinámicos que llevan a cabo las factorías automovilísticas para extrapolar la máxima información posible y adecuarla a la capacitación y medios disponibles, los cuales son significativamente muy reducidos. No obstante, también se han tenido en consideración estudios realizados por Universidades, artículos de investigación y tesis doctorales, cuya infraestructura y medios en diversos casos son relativamente equiparables, los cuales se referencian sucesivamente a medida que se trata cada uno de los temas asociados.

2.2.2. Diseño y construcción mecánica de la maqueta

Se ha diseñado y construido una maqueta de automóvil [78] a escala 1:12 según se observa en la Figura 2.4, basada en la misma forma estructural que la realizada previamente en la modelización tridimensional en Autocad 3D® en la fase de diseño de la maqueta y deflector en 3D (Fase V, Figura 2.1) para la simulación computacional, con el fin de que las comparativas entre ambos métodos se realicen considerando el mismo diseño de carrocería y por tanto, bajo las mismas condiciones.



a)



b)

Figura 2.4. Maqueta de vehículo: a) vista delantera; b) vista trasera.

La estructura de la maqueta constituida por los laterales y la base, se ha construido con madera de pino debido a que es un material que aporta rigidez y robustez, mientras que al mismo tiempo es un material al que se le puede adaptar la forma con relativa facilidad. Al utilizar tablón de madera en vez de, por ejemplo, metal, se dispone de espesor suficiente para dar las curvaturas pertinentes en las aristas sin perjudicar la maniobrabilidad y se evitan posibles vibraciones si se utilizase un pequeño espesor metálico, de modo que la madera facilita la ejecución de las adaptaciones y acoplamientos.

Sin embargo, el capó, techo y parte trasera del vehículo se han construido con metacrilato, ya que su estructura requiere mayores curvaturas y es más complicado de ejecutar con madera. El metacrilato es un material más fácil de deformar y para dotarle de la curvatura precisa en cada zona se ha empleado un soplador de aire caliente. El procedimiento seguido es en primer lugar buscar o crear una pieza metálica cilíndrica con el diámetro de la curvatura buscada en el metacrilato, seguidamente se aplica calor con el soplador de aire caliente a unos 400 °C y a una distancia de 35 cm aproximadamente enfocando el flujo sobre la zona deseada a curvar. Posteriormente se apoya la lámina de metacrilato sobre el cilindro metálico para que quede moldeada a su forma durante el tiempo de enfriamiento, que es en torno a 5 o 10 minutos.

Ambos materiales, madera y metacrilato, proporcionan una superficie exterior lisa, adecuada para asemejarse en los ensayos empíricos a la superficie que tienen los vehículos reales a escala 1:1.

El proceso de fabricación de la maqueta de vehículo se ha realizado en las siguientes 8 fases:

- Fase I: se parte de origen de tres tablas de madera, tal que a cada una se la corta mediante una sierra de calar con la forma asociada a la medida exterior. De manera que una tabla es la correspondiente a la base y las otras dos tablas a cada uno de los laterales.
- Fase II: con la finalidad de curvar los dos laterales en su zona delantera hacia el interior para disminuir la resistencia, se introdujeron en agua hirviendo los extremos a curvar, posteriormente se posicionaron sobre una matriz de hierro a modo de molde, sobre los que se ejerció la presión suficiente mediante gatos carpinteros. Trascorrido el tiempo de secado, se retiran los gatos y se ensamblan a la base de la maqueta mediante espigos y cola.



- Fase III: se lijan y redondean todas las aristas, procediendo posteriormente a suavizar y pulir los cantos y bordes para conseguir mayor aerodinámica frente al aire que impactará.
- Fase IV: las superficies se planifican gracias a una lijadora orbital.
- Fase V: a lo largo de todo el perímetro de los dos laterales exceptuando la arista que se acopla con la base, en su parte interior se ha realizado un rebaje con la medida del espesor del metacrilato, con la finalidad de que se apoye la lámina de metacrilato que constituye la parte frontal, techo y parte trasera, sobre la superficie resultante para aportar solidez y un cierre ajustado. Asimismo, para dotar a la estructura de la estanqueidad requerida para evitar circulación de aire indeseada, se sella con cola rápida en la totalidad del perímetro.
- Fase VI: para garantizar la solidez se ha posicionado un tornillo pasante que une ambos laterales permitiendo un efecto de compresión que a su vez facilita un mejor ajuste y cierre de los laterales respecto del metacrilato en todo su perímetro superior a la base.
- Fase VII: las ruedas se han constituido con rodamientos para garantizar la adecuada movilidad, los cuales son de SKF 6200-2RSH ([Anexo B.6](#)) alojados sobre un eje metálico que pasa de lado a lado por el lado inferior de la base de la maqueta. Dichos rodamientos están embutidos en un aro mecanizado en el torno partiendo de una barra cilíndrica de poliamida para evitar exceso de deslizamiento, lo que a su vez permite colocar un eje con un diámetro inferior al que habría que ubicar si el rodamiento fuese de mayor diámetro exterior, ya que ambos diámetros del rodamiento mantienen proporcionalidad. Por otro lado, el diámetro exterior del aro de nylon, se mecaniza acorde a escala. Por tanto, cada par de ruedas está unido mediante un eje solidario, de tal manera que el eje está fijado a la base mediante tornillos, manteniendo paralelismo y alineación entre el eje delantero y trasero.
- Fase VIII: los cuatro orificios que quedaban asociados a cada una de las cuatro ruedas, se cubren mediante una tapa de madera con forma semicilíndrica que se posiciona en la parte interior de la maqueta, quedando así estanca.

Asimismo, indicar que el diseño estructural de la maqueta es muy aerodinámico, por un lado, la parte delantera ([Figura 2.4a](#)) permite así captar gran cantidad de aire, pero por otro lado, la parte superior de la parte posterior ([Figura 2.4b](#)) tiene una gran curvatura que ofrece poca resistencia y favorece en consecuencia la aerodinámica, lo que implica que es muy conservador para analizar el efecto del sistema de canalización aerodinámico porque facilita la canalización del aire hacia la parte posterior intrínsecamente y por tanto, se detectará que hay menos diferencia de ganancia al incorporar el deflector.

De modo que, si por ejemplo se considerase la carrocería de una furgoneta (ya que normalmente el lado posterior es prácticamente llano sin curvaturas aerodinámicas ([Figura 2.5](#)), al prevalecer fundamentalmente la optimización de espacio interno en este sector de vehículos), se apreciaría en mayor magnitud la ventaja competitiva que ofrece el sistema de canalización aerodinámico.

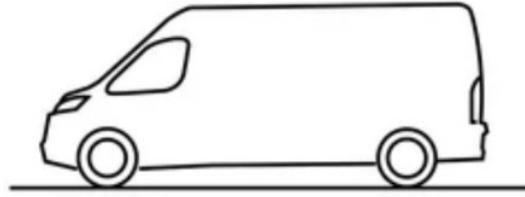


Figura 2.5. Geometría de la carrocería de una furgoneta.

2.2.3. Diseño y construcción mecánica del sistema de canalización aerodinámico

El sistema de canalización aerodinámico se ha diseñado con el objetivo de captar el aire frontal que incide en la parte delantera del vehículo, sobre el capó y también el aire que impacta en la luna, con la finalidad de trasladarlo a la parte posterior, de tal manera que se ubica por encima del techo del automóvil.

Para ello, en primer lugar, se ha construido la pieza superior basada en un deflector con una curvatura tal que, permite en cada caso que el flujo de aire que circule por su interior mantenga en lo posible uniformidad de proyección de las líneas del flujo de aire [79]. Además, para favorecer la aerodinámica y disminuir posibles turbulencias en la incidencia del aire con el deflector [80], la arista delantera sobre la que impacta el aire tiene un perfil aproximado de gota en sección y curvatura [81].

Posteriormente se han construido las dos piezas laterales, las cuales permiten conformar la cavidad, evitando que el aire se salga por los laterales y a su vez, facilitan la canalización del aire, favoreciendo que se mantenga la dirección de las líneas del flujo de aire desde la entrada hasta la salida, lo que a su vez implica, que no se disperse y, por tanto, se mantenga concentrado hasta la expulsión donde se pretende conseguir una presión superior. Los dos laterales tienen una superficie recta y por consiguiente, uniforme, no obstante, disponen de una curvatura en la parte inferior y superior para adaptarse a la forma del techo del vehículo y del extremo lateral del deflector respectivamente. Asimismo, las aristas delanteras sobre las que incide directamente el aire que impacta, tienen también forma aproximada de gota para evitar cambios bruscos de dirección.

El material con el que se ha construido el deflector es también metacrilato, debido a que se puede dar la curvatura requerida en cada posición con los medios e instrumentos disponibles. Asimismo, la unión de las tres piezas se ha realizado mediante cordón de silicona, el cual tiene una superficie redonda que no afecta apenas a la dirección de las líneas de flujo.

Para el sistema de instalación del sistema de canalización aerodinámico se pensó que tenía que cumplir el requisito de utilizar un método que permitiese incorporarlo y retirarlo con facilidad para un adecuado desarrollo de los ensayos experimentales. Finalmente se optó por realizar una acanaladura en la parte superior de cada lateral a lo largo de su longitud correspondiente a la zona del techo, de modo que al deflector se le han prolongado los dos laterales (Figura 2.6) para que tenga el margen suficiente para poderlos introducir en su respectiva acanaladura. El diseño se ha pensado de tal manera que simplemente haya que introducir la prolongación en la acanaladura, fijándola mediante un tornillo que atraviesa el lateral y el metacrilato; quedando bien encajado y sujeto de modo que permanezca inmóvil ante el aire incidente que proporciona el túnel de viento a la

velocidad máxima de 76 km/h. Por el contrario, es igualmente sencillo el paso de retirar el deflector de la maqueta, quitando el tornillo de fijación.



a)



b)

Figura 2.6. Deflector: a) vista delantera; b) vista trasera.

En la [Figura 2.7a](#) se observa desde una vista en perspectiva la parte delantera de la maqueta con el deflector incorporado, apreciándose la cavidad que queda formada para captar y canalizar el flujo de aire incidente.

Asimismo, en la [Figura 2.7b](#) se muestra una vista en perspectiva de la maqueta desde la parte trasera, observándose la forma descendente que tiene la parte superior del deflector desde la mitad de su longitud hasta su finalización, cuya geometría favorece el redireccionamiento del flujo de aire canalizado por su interior desde la parte delantera a la zona trasera, facilitando así que descienda hacia la zona inferior de la parte posterior y lo más próximo posible a la maqueta, ya que es donde se produce más vacío.



a)



b)

Figura 2.7. Maqueta con deflector: a) vista delantera; b) vista trasera.

2.2.4. Diseño y construcción del túnel de viento

Seguidamente, se indican las principales fases de las que ha constado el proceso para llegar a disponer del citado túnel aerodinámico:

- (i) Fase I: estudio y análisis de túneles de viento de factorías automovilísticas, centros de investigación y universidades junto con sus respectivas aplicaciones, características y resultados.



- (ii) Fase II: valoración de las posibilidades técnicas en función de los elementos, dispositivos y equipos de los que se podía disponer en el taller familiar.
- (iii) Fase III: valoración económica para la adquisición de los dispositivos y equipos de los cuales no se disponía.
- (iv) Fase IV: diseño de la tipología del túnel de viento y características en función del análisis realizado en las fases II y III.
- (v) Fase V: acopio de los materiales, máquinas-herramientas, útiles, equipos, dispositivos e instrumentos necesarios.
- (vi) Fase VI: diseño dimensional específico del conjunto del túnel de viento, así como de cada uno de los elementos individuales.
- (vii) Fase VII: ejecución de la construcción.
- (viii) Fase VIII: puesta en marcha.
- (ix) Fase IX: análisis de funcionalidad del túnel de viento.

A continuación, se explican con mayor detalle las fases IV, VII, VIII y IX al ser consideradas las más relevantes.

- **Fase IV: Diseño de la tipología del túnel de viento y características en función del análisis realizado en las fases II y III.**

A priori, se plantean las 3 clasificaciones de túnel aerodinámico según la tipología física: a) tipo de retorno; b) el tipo de cámara de ensayos y c) la posición de los ventiladores [82,83].

a) En primer lugar, respecto al tipo de retorno del flujo de aire, se dispone de 2 posibilidades, circuito cerrado y circuito abierto.

Por un lado, en los túneles aerodinámicos con circuito cerrado, el flujo fluido describe en su movimiento una trayectoria cerrada por el interior del túnel, recirculando de forma continua por el circuito de retorno, con poco o ningún contacto con el exterior, dependiendo de si se introduce aire nuevo del exterior al circuito. Esta configuración presenta una serie de características ventajosas, tales como un mayor control sobre la calidad del flujo en el interior del túnel de viento ya que la influencia del entorno en la instalación es relativamente baja. A su vez, se produce un menor consumo de energía debido a la menor pérdida de carga y a que no hay que acondicionar el flujo de aire que se introduce del exterior en los túneles de viento de circuito abierto. Por último, también se genera una menor contaminación acústica. Sin embargo, los circuitos cerrados tienen varios inconvenientes, como una mayor complejidad para las técnicas de visualización del flujo y la necesidad de emplear dispositivos de refrigeración o intercambiadores de calor debido a la recirculación continua del flujo de aire, lo que a su vez implica un significativo mayor coste debido también a los requerimientos de la infraestructura respecto de los túneles con circuito abierto.

Por otro lado, la tipología de circuito abierto conlleva el hecho de que el aire es soplado y/o aspirado de modo que una vez que atraviesa el túnel de viento, se escapa hacia la atmósfera. Su principal



ventaja radica en la necesidad de menores gastos de construcción. Asimismo, permite la posibilidad de emplear técnicas de visualización del flujo ya que el aire se obtiene y expulsa al exterior.

No obstante, tienen el inconveniente de la necesidad de acondicionar el flujo entrante ya que está fuertemente influenciado por el entorno en el que se encuentra la infraestructura. Asimismo, se necesita un mayor aporte de energía cuando el túnel se encuentra en puntos de potencia elevada y además, se produce una gran contaminación acústica, por lo que serán necesarios distintos tipos de insonorización del túnel.

De modo que, analizando las diversas características de ambos tipos de circuitos, se opta por la configuración de circuito abierto, principalmente fundamentado en el coste económico de la construcción que la autora es capaz de asumir. Con el fin de combatir el mayor ruido generado, se descarta la opción de diseñar y construir elementos de insonorización sobre el propio túnel aerodinámico por motivos económicos y de tiempo requerido, de modo que se estipula la utilización de equipos de protección individual contra el ruido ([Anexo B.1](#)).

b) En segundo lugar, se analizan los tipos de cámara de ensayos, pudiendo ser de sección abierta o de sección cerrada.

Las cámaras de ensayos de sección abierta implican que se comunican por alguno de sus límites o por todos ellos con el exterior, quedando sometidas a las continuas variaciones atmosféricas. Por el contrario, en las cámaras de ensayo con configuración cerrada, la sección de pruebas posee paredes sólidas que la aíslan del flujo fluido atmosférico externo durante el ensayo, evitando consecuentemente las variaciones ambientales, no obstante, su construcción requiere mayor complejidad, pero aún así, la sección cerrada constituye la configuración de cámara de ensayos más común.

A continuación, se indican en la [Tabla 2.1](#) las denominaciones de los distintos tipos de túneles aerodinámicos asociadas para la combinación de posibilidades de retorno del flujo de aire (a) y de la cámara de ensayos (b).

Tabla 2.1. Tipología túneles de viento.

	Circuito abierto	Circuito cerrado
Cámara de ensayos abierta	Eiffel	Prandtl
Cámara de ensayos cerrada	NPL	Göttingen

Asimismo, en la [Figura 2.8](#) se muestra una representación de cada uno de los 4 tipos de túneles de viento según el tipo de retorno del flujo de aire y la configuración de la sección de la cámara de ensayos.

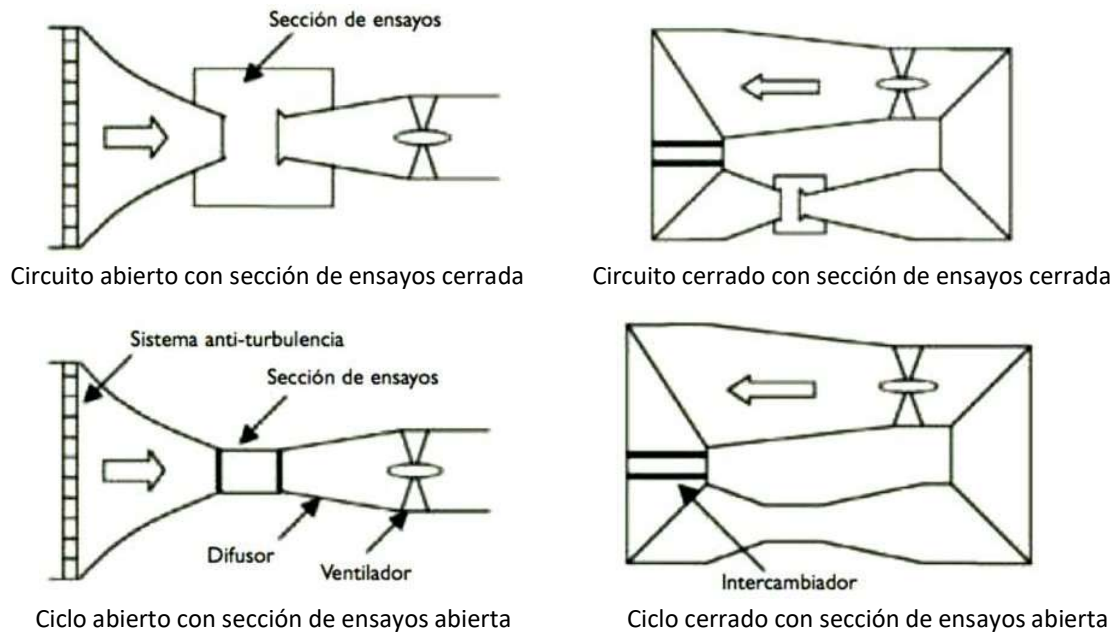


Figura 2.8. Clasificación túneles de viento en función de la cámara de ensayos y retorno.

De modo que la tipología del túnel aerodinámico seleccionada para la presente investigación es NPL (National Physics Laboratory) en la que la cámara de ensayos es cerrada y el circuito de circulación del flujo de aire es abierto ya que no se recircula. No obstante, el túnel de viento construido también puede adaptarse a la configuración de tipo Eiffel [84] debido a que son desmontables las 4 paredes.

c) En tercer lugar, se analiza la clasificación física de los túneles de viento en función de la posición de los ventiladores.

Inicialmente se define un ventilador como una turbomáquina que transfiere potencia a un fluido con un rendimiento determinado, induciendo sobre el fluido una sobrepresión e incrementando su movimiento. Dependiendo de dónde se ubique el ventilador, la cámara de ensayos dispone de fluido succionado o impulsado, en función de si se coloca a la salida o a la entrada del túnel de viento respectivamente. Inicialmente, se seleccionó la disposición de ventilador succionador debido a que permite disponer de flujo más laminar.

Por tanto, en un primer nivel de clasificación física del túnel de viento [85], la configuración es como la mostrada en la Figura 2.9 pudiéndose observar que el aire pasa una única vez por el interior del túnel y sale. Simultáneamente se visualiza que la cámara de ensayos es cerrada delimitada por paredes, no obstante, en la imagen al haberse realizado un corte transversal para favorecer la didáctica, no se ve la cuarta pared. A su vez, aparece reflejado el ventilador posicionado a la salida del túnel de viento, por lo que actuará como succionador.

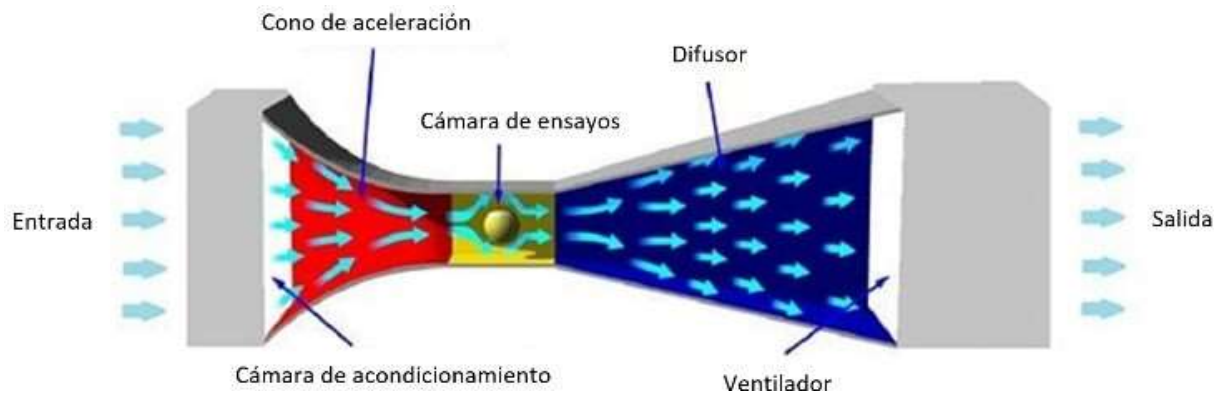


Figura 2.9. Configuración física seleccionada para el túnel de viento.

A continuación, se detalla la Fase VII de ejecución de la construcción, explicando la totalidad de los elementos constituyentes del túnel aerodinámico [86], no obstante, esta fase a su vez se subdivide en dos fases secundarias en función de la máxima velocidad que consigue alcanzar el túnel de viento, inicialmente 50 km/h y posteriormente 76 km/h respectivamente:

- **Fase VII.I: Ejecución de la construcción del túnel aerodinámico que alcanza una velocidad máxima de 50 km/h.**

A continuación, se explican los diversos elementos constitutivos requeridos en orden secuencial desde la entrada de aire hasta la salida del mismo, que, según se muestra en la [Figura 2.10](#), es de izquierda a derecha. Además, se describe el proceso de construcción llevado a cabo asociado al conjunto y a cada uno de los elementos de forma individual.



Figura 2.10. Túnel de viento construido en fase VII.I que alcanza 50 km/h.

Este túnel aerodinámico se fundamenta únicamente en el efecto de succión. En la [Figura 2.11](#) se identifican mediante un diagrama de flujo los diversos elementos que lo componen en el orden por



el que discurre el flujo de aire desde que entra por el acondicionador de flujo hasta que sale al exterior nuevamente, una vez que ha pasado por el ventilador de succión:

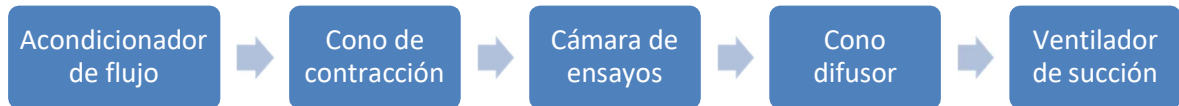


Figura 2.11. Elementos constitutivos del túnel de viento Fase VII.I que alcanza 50 km/h.

A continuación, se explica cada uno de los elementos de manera individualizada, no obstante, se muestra a priori un resumen del recorrido del flujo de aire, de modo que el aire comienza la trayectoria entrando en el circuito por la sección de acondicionamiento de flujo, para llegar a la zona de contracción donde, debido a la reducción de la sección del conducto y conservación de la masa, pierde presión y gana velocidad, pasando a entrar después en la cámara de ensayos. A continuación, circula a través del difusor donde debido al aumento de la sección, pierde velocidad a costa de ganar presión, para regresar finalmente al exterior por medio de la sección del ventilador de succión.

- Acondicionador de flujo: se ha construido un acondicionador de flujo como elemento inicial, de modo que es el dispositivo que capta el aire atmosférico. Su misión es dotar de uniformidad al flujo de aire entrante ya que originariamente tiene carácter turbulento [87]. Por tanto, la finalidad del acondicionador de flujo es que el aire a su llegada al cono de contracción disponga de un régimen lo más laminar posible, lo cual se consigue amortiguando las componentes laterales medias y fluctuantes del flujo [88].

El principio de funcionamiento consiste en dotar al flujo de aire de la dirección deseada al hacer pasar el aire a través de una sección cuyo diseño se basa en la geometría mallada de un panel de abejas, no obstante, cada celda en vez de tener forma hexagonal tiene forma circular (Figura 2.12). De este modo, la amortiguación tanto de la componente longitudinal de la turbulencia como de la no uniformidad del flujo medio en la misma dirección, dependen de la relación entre la longitud del espesor del acondicionador y de la escala de turbulencia corrientes arriba [89].

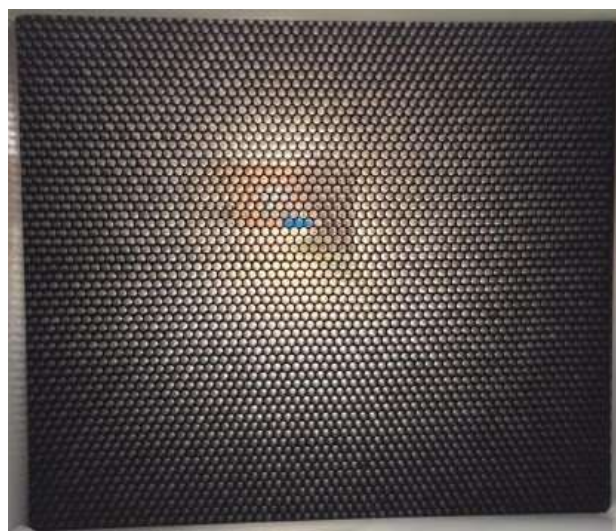


Figura 2.12. Estructura del acondicionador de flujo.



La sección del acondicionador de flujo es de 1 m x 1 m la cual queda definida por el cono de contracción tal y como se explicará posteriormente en su apartado específico. Por tanto, al partir del valor de la sección, se determinó el número necesario de tubos a instalar mediante la relación que indica que el número de celdas debe ser del orden de 150 por el diámetro de la cámara de estabilización. De modo que, finalmente se instalaron 4.305 tubos con un diámetro interior de 14 mm y un diámetro exterior de 16 mm cada uno de ellos que ocupan la totalidad de la sección.

Por otro lado, la longitud de cada celda (longitud de cada tubo) se ha calculado en base a la relación que establece que el espesor del panel debe ser de 6 a 8 veces el diámetro hidráulico de las celdas, por lo que al considerar el valor medio de 7 y multiplicarlo por el diámetro interior de 14 mm, la longitud de todos y cada uno de los tubos es de 90 mm.

A cada lado del perímetro del acondicionador de flujo se ha acoplado un perfil de madera al que se ha dado forma convexa para favorecer la canalización del aire hacia el interior del túnel, según se observa en la [Figura 2.13](#).



Figura 2.13. Acondicionador de flujo incorporado al túnel de viento.

- Cono de contracción: su función es comprimir el aire que entra por el acondicionador de flujo hasta la cámara de ensayos gradualmente denominándose área de contracción o tobera según se muestra en la [Figura 2.14](#). La zona de contracción, que se sitúa entre la zona de condicionamiento de flujo y la cámara de ensayos, es el segundo componente del túnel de viento y la más importante para obtener la calidad de flujo necesaria.

Su misión consiste en dotar al flujo de la velocidad necesaria para la cámara de pruebas, el cual ha sido previamente acondicionado. El flujo de aire que transcurre por esta zona es acelerado debido a la contracción de radio que se produce progresivamente a lo largo de esta. Esta reducción gradual de la sección reduce el grosor de la capa límite en la cámara de ensayos y evita la formación de vórtices,



desprendimientos y turbulencias. Esta zona produce una reducción en las principales perturbaciones de la corriente de aire, y cuanto mayor sea el coeficiente de reducción, es decir, cuanto más progresiva sea la contracción, mayor calidad en la corriente de aire.



Figura 2.14. Cono de contracción.

○ Cámara de ensayos: es cerrada para evitar las interferencias con el aire exterior, no obstante, está construida con metacrilato para favorecer la visualización según la [Figura 2.15](#). Asimismo, se ha diseñado de manera que puede abrirse por la parte superior, lo que permite versatilidad en la colocación de las diversas maquetas en su interior, ya que es donde se toman las medidas en diferentes condiciones. Además, los 2 laterales y la base también son desmontables mediante tuercas de apriete manual, con la intención de que en un futuro pueda utilizarse como túnel de viento con cámara de ensayos abierta.



Figura 2.15. Cámara de ensayos.

Resulta de interés que la sección de pruebas sea de menor área que el resto del túnel de viento, ya que por conservación de flujo másico genera una velocidad mayor cerca del modelo. De este modo, se consigue ahorrar energía en el ventilador debido a que genera el mismo efecto en la sección de pruebas con una potencia menor puesto que sólo esa zona del túnel de viento, la cámara de ensayos, está sometida a velocidad más elevada, lo que además reduce las pérdidas por fricción en las paredes y codos del túnel.



La cámara de ensayos es la zona donde se realizan las diferentes pruebas aerodinámicas sobre la maqueta de vehículo y, por tanto, donde se colocan las maquetas de vehículo. Dicha cámara tiene que disponer de las condiciones adecuadas, de modo que el aire proporcionado tiene que alcanzar unos parámetros mínimos, tal como un régimen laminar, caracterizando así a la cámara de ensayos como un componente de vital importancia. Por tanto, en esta zona se pretende obtener un flujo controlado que presente una serie de características determinadas, de velocidad y turbulencia, que permita representar la situación a simular.

Las paredes de la cámara de ensayos habrán de estar lo más alejadas que sea posible de la maqueta a testear para obtener un perfil de flujo más similar al real, puesto que si el cociente entre el área frontal del modelo y el área de la sección de ensayos es mayor que 0,075, la obstrucción que supone el modelo al paso del aire provoca un flujo poco realista con el que se introducirían errores en las mediciones (la obstrucción provocaría mayores velocidades de flujo entre el modelo y las paredes y los datos estimados se desviarían de los datos medidos en condiciones reales) [90]. Por ello, es deseable que el área de la sección de ensayos sea lo mayor posible, no obstante, a mayor área, el coste de construcción y a su vez, la potencia necesaria en el ventilador, aumentan considerablemente.

o Cono difusor: favorece una expansión progresiva de la salida del aire, al incorporarse a la salida de la sección de la cámara de ensayos un difusor encargado de aumentar el área y disminuir la velocidad del aire de manera progresiva, con el mismo fundamento que el cono de contracción pero en sentido inverso. El cono difusor es un elemento cuya función es convertir la energía cinética del fluido en presión estática gracias a la ecuación de Bernoulli, según la cual para una mayor sección se produce una reducción en la velocidad en pro de la presión. Cuanto menor sea el ángulo de difusión entre la sección de partida y final, menor será el coeficiente de resistencia del difusor hasta un valor de ángulo límite [91].

Para el desarrollo de la presente Tesis Doctoral, el difusor se ha conformado con una chapa galvanizada formando un tronco de cono de 80 cm de longitud, soldado a un convertidor de sección circular a rectangular (Figura 2.16).



Figura 2.16. Cono difusor.



o Ventilador de succión: su misión es aspirar el aire, generando así las condiciones necesarias del flujo de aire en cuanto a velocidad en el interior de la cámara de ensayos. Tiene una potencia de 1,6 kW (Figura 2.17), de tal manera que la velocidad de giro se varía mediante un regulador electrónico integrado (Figura 2.17b) el cual está alimentado con tensión continua de 0 a 10 V y, por tanto, se regula mediante una consigna de tensión de corriente continua.

El motor está incorporado en el interior del núcleo de las hélices del propio ventilador, cuya disposición permite mejorar el rendimiento debido a que hay menor distancia en el eje motriz, y esto, a su vez, facilita la reducción del espacio necesario, del ruido ocasionado y de las vibraciones. Las características técnicas se indican en el Anexo B.7.



a)



b)

Figura 2.17. Ventilador de succión; a) vista posterior; b) regulador.

Una vez contruídos todos y cada uno de los elementos, se ensamblan de manera secuencial, alcanzando el túnel de viento una longitud total de 3,71 m. Posteriormente, todos los elementos se sustentan sobre una bancada que también se ha construído por medios propios, la cual es de acero, y además de aportar estabilidad al conjunto, permite versatilidad de desplazamiento mediante una traspaleta elevadora.

Por último, se ha lijado y pintado mediante pistola la parte interna del cono de contracción y del cono difusor, con la finalidad de que las superficies sean lo más lisas posibles y, por tanto, se eviten pequeñas turbulencias ocasionadas por porosidad y rugosidad. También se ha pintado exteriormente, no obstante, esta pintura aplicada en la parte de fuera, únicamente cumple una función estética.

Por tanto, se ha conseguido diseñar y construir un túnel de viento abierto de succión, con una cámara de ensayos cerrada que dispone de una sección útil de trabajo de 35 x 45 x 100 cm, sobre la que se suministra una velocidad de flujo de aire máxima de 50 km/h en régimen laminar (apartado 2.2.6 análisis del túnel de viento), con la finalidad de caracterizar los fenómenos producidos en el flujo de aire al incidir sobre la maqueta sin el sistema de canalización aerodinámico y paralelamente, también al impactar sobre la maqueta modelo a la que se incorpora dicho sistema de canalización aerodinámico.



• **Fase VII.II: Ejecución de la construcción del túnel aerodinámico que alcanza una velocidad máxima de 76 km/h.**

Con la tipología de túnel de viento descrito en la fase VII.I se alcanza una velocidad máxima de 50 km/h manteniéndose un régimen laminar en la cámara de ensayos. Con esas condiciones se realizaron los ensayos empíricos pertinentes para un primer estudio [Fernández-Gutiérrez et al (2023) [92]. No obstante, con la inquietud de optimizar la investigación y a su vez, las posibilidades del sistema de canalización aerodinámico ideado, se estudió la posibilidad de incrementar la velocidad máxima suministrada por el túnel de viento. El origen principal de la motivación se derivó de los resultados obtenidos en dicho estudio debido a que se concluyó que a las velocidades de 36 km/h, 42 km/h y 52 km/h el rendimiento incrementaba a medida que aumentaba la velocidad de análisis. En la presente investigación se pretende estimar el rendimiento a mayores velocidades.

De esta manera, para superar la velocidad de 50 km/h se han llevado a cabo tres mejoras. Cada uno de los procesos requeridos para implantarlas se explican a continuación:

○ Ventilador impulsor:

El diseño de túnel aerodinámico de la fase VII.I constaba únicamente de un ventilador de succión ubicado por tanto a la salida del túnel, el cual proporciona una potencia de 1,6 kW, sin embargo, para aumentar la velocidad del aire en la cámara de ensayos, se incorpora adicionalmente un ventilador con una potencia de 5,52 kW que proporciona un efecto de impulsión y tiene la función de complementar al ventilador inicial de succión. Por tanto, la tipología del túnel de viento pasa de ser de succión a ser mixta de succión y simultáneamente impulsión, manteniéndose la condición de túnel de viento de ciclo de retorno abierto.

○ Aumento de entrada de caudal de aire:

Un factor influyente en la velocidad que adquiere el aire en el interior de la cámara de ensayos es la cuantía de aire que es capaz de entrar por las cavidades delanteras del túnel de viento, de modo que se analizan los elementos que constituyen dicha parte inicial en orden secuencial para valorar si se puede optimizar alguna de las posibilidades:

(i) Ventilador impulsor: el ventilador que se ha acoplado en esta fase VII.II a la entrada para generar efecto de impulsión, tiene una potencia de 5,52 W y no se dispone de otro ventilador de mayor potencia para incorporarlo a la entrada del túnel aerodinámico con el efecto de impulsión.

(ii) Acondicionador de flujo: tiene la función de redistribuir el perfil de velocidad para conseguir unas condiciones aceptables de flujo basadas en un flujo de aire lo más homogéneo posible y, por tanto, evitar régimen turbulento. No obstante, al haber instalado 4.600 tubos para lograrlo en la mayor medida posible, a su vez implica que la sección de la pared de la totalidad de dichos tubos actúe como freno del aire incidente entrante. De esta manera, se planteó reducir la sección de la pared de los tubos y se optó por hacerlo mediante un proceso de mecanizado de avellanado, realizado con un taladro de mano al que se acopla una broca que se ha modificado previamente en el torno. Se ha avellanado tanto la entrada como la salida de los 4.600 tubos, lo que conlleva haber realizado 9.200



avellanados y haberse reducido la sección de cada tubo en 1 mm, resultando una entrada y salida con sección trapezoidal para disminuir el impacto del aire incidente.

(iii) Cono de contracción: se ha realizado mediante una máquina curvadora de 3 rodillos cilíndricos ajustables, que permite como máximo curvar chapas de hasta 100 cm de anchura, siendo la medida con la que se diseñó el cono de contracción y debido a que no se dispone de una máquina superior ni se contempla la posibilidad de comprar otra máquina mayor, entonces se descarta esta opción.

o Cambio de ubicación:

Debido a que los ensayos iniciales se realizaron en el interior de una nave, se decidió situar el túnel de viento fuera de dicha nave al aire libre para favorecer la circulación de aire y se incrementase el flujo de aire incidente, así como, que se incrementase a la salida del túnel de viento la cantidad de aire factible de ser succionada por el ventilador de succión.

Finalmente, una vez que se analizó la funcionabilidad del túnel de viento después de haber llevado a cabo las citadas tres mejoras, se obtuvo una velocidad máxima del aire en el interior de la cámara de ensayos de 76 km/h con un régimen laminar en la totalidad de la cámara de ensayos al obtenerse la misma presión en todos y cada uno de los puntos de la sección y longitud.

Seguidamente, en la [Figura 2.18](#) se identifican los elementos que conforman el túnel aerodinámico a través de un diagrama de flujo en el orden secuencial por el que discurre el flujo de aire, con la diferencia respecto del diagrama de flujo presentado en la [Figura 2.11](#) correspondiente con el túnel de la fase VII.I de que se ha incorporado un ventilador impulsor al inicio del proceso, precediendo al acondicionador de flujo:

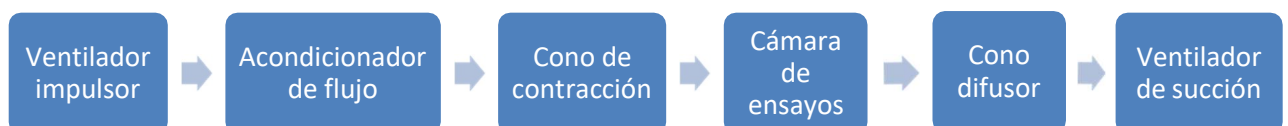


Figura 2.18. Elementos constitutivos del túnel de viento fase VII.II que alcanza 76 km/h.

A continuación, se explica únicamente la configuración y modo de funcionamiento del ventilador impulsor, debido a que es el único elemento que se incorpora adicionalmente respecto a la explicación de los elementos constitutivos del túnel aerodinámico de la Fase VII.II a partir de la [Figura 2.11](#) en la que se alcanzaba un máximo de velocidad de 50 km/h.

Un ventilador de impulsión basa su principio de funcionamiento en captar el aire del exterior y mediante el giro de su hélice y sus palas, lo impulsa hacia el interior del túnel a una determinada velocidad que depende de: (i) la velocidad de giro de la hélice; (ii) del diseño de las palas que conforman la hélice y (iii) de la sección del cono de contracción ya que es el elemento que está posicionado a continuación en el sentido de avance del aire.



Asimismo, a continuación se indican las principales similitudes y diferencias entre un ventilador de impulsión y un ventilador de succión, ya que con la nueva tipología de túnel aerodinámico se han utilizado ambas tecnologías.

En primer lugar, se establece como semejanza el hecho de que normalmente un mismo ventilador puede ser utilizado tanto en modo de succión como en modo de impulsión, de tal manera que el factor que pauta que sea de un tipo u otro es la ubicación del ventilador en el propio túnel de viento. Si se sitúa a la salida a continuación del cono difusor se trata de un ventilador de succión, mientras que si se posiciona delante del acondicionador de flujo se caracteriza como un ventilador de impulsión. En segundo lugar, se presenta como diferencia que los túneles de viento de succión presentan un régimen de flujo de aire más laminar que el detectado en los túneles aerodinámicos de impulsión, debido a que los ventiladores de impulsión suelen generar mayor perturbación, motivo fundamental para decantarse inicialmente en la presente Tesis Doctoral en el diseño de la tipología del túnel aerodinámico por un túnel de succión en vez de impulsión o mixto, sin embargo, se ha recurrido finalmente a incorporar adicionalmente el ventilador de impulsión para incrementar la velocidad del flujo de aire.

A pesar de ello, se ha obtenido con la nueva configuración un régimen laminar en la totalidad de la cámara de ensayos, justificado en el hecho de que la presión medida es exactamente la misma en todos y cada uno de los puntos del interior de la cámara de ensayos, es decir, en toda la sección de la cámara de ensayos y a lo largo de la totalidad de su longitud.

Concretamente, el ventilador impulsor que se ha instalado en el túnel aerodinámico construido ([Figura 2.19](#)) es de tipo axial, con una hélice de 90 cm de diámetro, la cual está formada por un conjunto de 6 palas. Consta de una potencia de 5,5 kW a 1.500 r.p.m ([Anexo B.8](#)). Su adecuada ubicación es posicionarlo delante del acondicionador de flujo, al cual se ha acoplado mediante una banda de goma de caucho de una sección de 10 mm de espesor y 80 mm de anchura en todo el perímetro del acondicionador de flujo para así conseguir un ajuste entre el ventilador de impulsión y el cono de contracción. Gracias a la goma de caucho se evita la transmisión de vibraciones del ventilador al resto de elementos del túnel de viento. Simultáneamente, permite dotar de estanqueidad entre el ventilador de impulsión y el acondicionador de flujo.



a)



b)

Figura 2.19. Ventilador impulsor: a) vista frontal; b) vista lateral.



La configuración final del túnel de viento consta de las 2 tipoloxías de ventilador, es decir, se dispone de un aporte mixto. A continuación, en la [Tabla 2.2](#) se muestra el porcentaje de participación de cada uno de los 2 ventiladores para cada ensayo experimental en función de la parametrización de la velocidad del flujo de aire proporcionado. De tal manera que a las 2 velocidades inferiores de 36 y 42 km/h, únicamente funciona el ventilador succionador con una potencia del 70 y 96 % respectivamente de su máximo posible. A medida que se incrementa la velocidad del flujo de aire a suministrar, mayor es la aportación del propio ventilador succionador, de modo que una vez que alcanza la máxima potencia admisible y se requiere mayor velocidad del fluido, se incorpora a partir de la velocidad de ensayo de 52 km/h el ventilador impulsor, con un incremento de aportación progresiva hasta que se alcanza el 100 %, lo que conlleva a lograr una velocidad máxima del flujo de aire proporcionada por el túnel de viento de 76 km/h.

Tabla 2.2. Porcentaje de participación de cada ventilador en función de la velocidad.

Velocidad (km/h)	Ventilador succionador %	Ventilador impulsor %
36	70	0
42	96	0
52	100	60
66	100	72
71	100	90
76	100	100

2.2.5. Metroloxía

Se indican los aparatos de medida e instrumentos utilizados a lo largo de todo el proceso experimental para medir la velocidad del flujo de aire, lo cual permite cuantificar las variaciones en el flujo de aire provocadas por la incorporación del sistema de canalización aerodinámico.

- **Tacómetro**

Con el objetivo de medir la velocidad de giro de los ventiladores del túnel de viento, se utiliza un tacómetro óptico y de contacto ([Figura 2.20](#)), concretamente el modelo electrónico digital DT-2238 ([Anexo B.2](#)).

El procedimiento de medida no se puede realizar directamente apoyando el tacómetro sobre una de las hélices del ventilador puesto que no es eje de giro. Por tanto, se ha colocado una pegatina blanca sobre una de las hélices y debido a que el tacómetro inyecta una luz que incide sobre la pegatina (hay que situar la proyección de la luz perpendicular a la pegatina). Esta luz se refleja sobre el tacómetro, siendo cada reflejo una vuelta de giro, de modo que la totalidad de revoluciones se observa en la pantalla digital.

Simultáneamente el tacómetro emite una señal luminosa roja que tiene que parpadear continua y rápidamente, lo que permite verificar si el funcionamiento es correcto.



Figura 2.20. Tacómetro.

- **Anemómetros**

Ante la diversidad de elementos y equipos requeridos sobre los que realizar la ejecución de las diferentes y numerosas medidas, ha sido necesario disponer de varios tipos de anemómetros, especificando seguidamente las características de cada uno de ellos. Previamente, indicar que los anemómetros mostrados en las Figuras 2.21 y 2.22 son de creación propia, ya que se ha partido de ventiladores que tras una previa adaptación son utilizables como anemómetros.

A) Ventilador PAPST tipo 4124 GX, de 100 mm de diámetro y 5 aspas (Figura 2.21), que consta de cuatro imanes permanentes y el correspondiente grupo de bobinas. Para la adaptación se ha procedido a desmontarlo, extrayéndole la placa electrónica que formaba el convertidor, se ha reconectado los grupos de bobinas formando los pares de polos y dándoles salidas de conexionado al exterior, quedando un generador al que se le conecta a un voltímetro de tensión alterna que marca la tensión generada en función de la velocidad, pudiendo así equiparar la tensión con una velocidad conocida, constituyendo un anemómetro.



Figura 2.21. Anemómetro con ventilador PAPST.

B) Ventilador BRUSHLESS modelo AFB0612L, de 55 mm de diámetro con el que se ha realizado la misma operación de conexionado y adaptación que con el ventilador anterior PAPST.

Se han preparado 2 anemómetros de tal manera que cada uno de ellos tiene un tamaño diferente, para adecuarse a las diversas condiciones y debido a los problemas existentes al tener que medir en algunos puntos en secciones muy reducidas, lo cual resulta prácticamente imposible en función de dónde, cómo y qué se requiere comprobar. Cada tipo aporta unas ventajas y unos inconvenientes,



por exemplo, el anemómetro de mayor diámetro permite medir con mayor estabilidad y menores fluctuaciones. Por el contrario, con el anemómetro de menor diámetro, aunque hay mayores fluctuaciones, se puede medir en secciones reducidas, hecho que el anterior no permite, ya que necesitaría una proyección de aire de sección mayor que en muchas ocasiones no se dispone, ya que algunos ventiladores suministran caudal de aire más intenso en una proyección de menor diámetro.

A ambos anemómetros se les ha acoplado una varilla metálica de longitud 30 cm (Figura 2.22) con la función de acoplador alargador para evitar sujetarlo con la mano y así disminuir las vibraciones intrínsecas del pulso de la mano y las perturbaciones del flujo de aire, ya que la mano obstaculiza, corta, y retiene el aire implicando su redireccionamiento. A su vez, a la varilla se la ha ensamblado un cilindro de madera corrugado al extremo por el que se sustenta con la mano, para impedir que resbale y así no variar la inclinación respecto a la perpendicular de la proyección del aire a la salida del ventilador.



Figura 2.22. Anemómetros con ventilador Brushless.

Para una mayor precisión en la medida de la velocidad del flujo de aire con estos dos anemómetros, se ha considerado conveniente medir la frecuencia generada y equipararla con una velocidad conocida, dado que la frecuencia es directamente proporcional a las revoluciones del ventilador y así establecer correspondencias.

A continuación, se explica el proceso llevado a cabo para determinar la velocidad del viento a través de los dos ventiladores indicados anteriormente (PAPST y BRUSHLESS). Inicialmente se estableció una relación lineal entre los valores de tensión eficaz obtenidos en bornes de los motores de los ventiladores y la velocidad de giro, para lo cual se han realizado varias comprobaciones prácticas:

- Con un vehículo real circulando en carretera a distintas velocidades haciendo incidir el aire sobre el ventilador y midiendo las diferentes tensiones en bornes.



- Con el ventilador Casals al disponer de una sección de salida de aire reducida, facilita el poder ubicar los distintos ventiladores para establecer las relaciones de tensión-velocidad.

No obstante, tras las comprobaciones anteriores se ha podido llegar a la conclusión de que la relación que se pretendía establecer de velocidad-tensión no es del todo fiable, ya que es lineal para un rango de medida, pero a partir de valores de velocidad determinados se pierde la linealidad con la tensión en los dos ventiladores. La situación anterior implicó tener que estudiar el fenómeno producido en la generación de la fuerza electromotriz, a través de la Ley de Faraday y Lenz, la cual responde a la siguiente ecuación:

$$E = - \frac{d\phi}{dt} = \omega \cdot B \cdot S \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2.1)$$

donde:

E: fuerza electromotriz inducida (v)

ϕ : flujo magnético (Wb)

B: inducción (T)

S: superficie de la espira (m²)

ω : velocidad angular (rad/s)

t: tiempo (s)

Analizando las variables que afectan en el cálculo de la f.e.m. se ha observado que el motivo de la pérdida de la linealidad entre la tensión-velocidad se debe a la inducción magnética B, la cual se relaciona con la función de la intensidad de campo magnético H y el coeficiente de permeabilidad magnética μ mediante la siguiente ecuación:

$$B = \mu \cdot H \quad (2.2)$$

En la [Figura 2.23](#) se observa la curva que relaciona la inducción magnética y la intensidad de campo magnético, de modo que entre los puntos "O" y "a" la relación B-H es lineal, lo que se traduce en una linealidad de tensión-velocidad, mientras que a partir del punto "a" deja de ser lineal y a partir del punto "b" de saturación tampoco es lineal, lo que justifica el problema mencionado anteriormente.

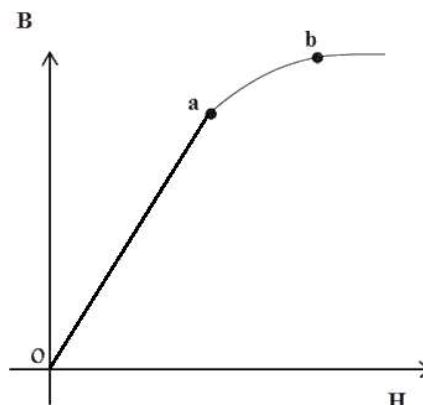


Figura 2.23. Relación inducción magnética respecto intensidad de campo magnético.

Ante la problemática anterior y teniendo en cuenta los factores de los que depende la f.e.m. se ha optado por medir la velocidad del flujo de aire a través del término $\text{sen}(\omega t)$, es decir, la frecuencia



de la velocidad angular ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$) de la f.e.m. generada, la cual es directamente proporcional a la velocidad de giro y no varía por la saturación, solucionándose el problema surgido al medir la tensión.

A continuación, se ha utilizado el multímetro Fluke 43B (Figura 2.24a y Anexo B.3) para convertir la fuerza electromotriz generada por los 2 anemómetros de fabricación propia, en el equivalente de velocidad del flujo de aire. A su vez, facilita medir la frecuencia que genera el anemómetro, siendo relación directa los impulsos inducidos en el anemómetro respecto de la velocidad, lo que permite establecer una relación de una velocidad conocida de flujo de aire respecto de la frecuencia que indica el polímetro. Además, este polímetro permite ver la onda de salida (Figura 2.24b).

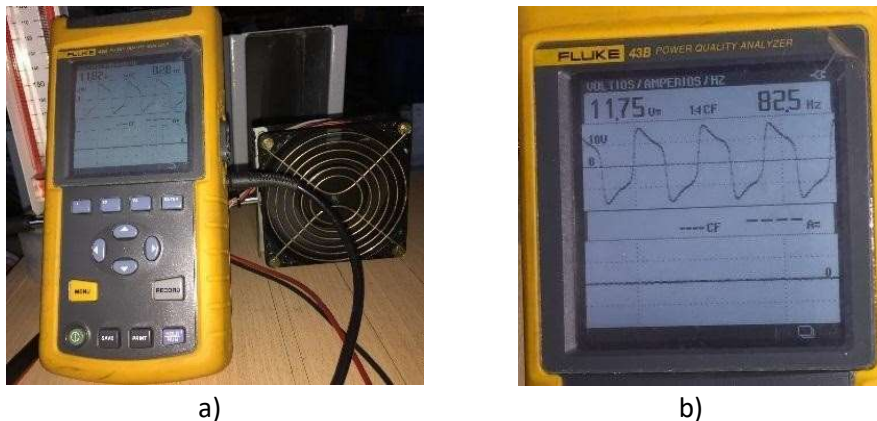


Figura 2.24. Polímetro: a) dispositivo; b) visualización de ondas.

A) Anemómetro digital:

Posteriormente se adquirió el anemómetro digital [93] que aparece en la Figura 2.25 por la versatilidad que ofrece al disponer en un único dispositivo y de reducido tamaño, de todos los elementos para proporcionar directamente las medidas necesarias.

En primer lugar, se probó midiendo la velocidad alcanzada por un coche circulando en carretera y comparando los resultados con la velocidad marcada por el propio vehículo, verificándose la precisión del anemómetro. Se ha utilizado para analizar el comportamiento del aire en multitud de situaciones. Su ficha de características se puede ver en el Anexo B.4.



Figura 2.25. Anemómetro digital.



- **Columna de agua**

Se ha necesitado utilizar una columna de agua debido a que los anemómetros están limitados al espacio donde se requieren emplear y precisamente las mediciones se tienen que realizar en el interior de la cámara de ensayos del túnel de viento cuyas dimensiones son relativamente reducidas, $35 \times 45 \times 100$ cm. Además, el empleo de la columna de agua queda justificado teóricamente mediante el principio de Bernoulli, que establece la relación entre la presión estática y la dinámica a lo largo de una línea de corriente en un movimiento potencial, incompresible y estacionario [94]. Este principio expresa que la presión total o de remanso de todas las partículas fluidas que discurren a lo largo de una misma línea de corriente es la misma. La constante puede variar en un caso general de una línea de corriente a otra, pero si las condiciones de corriente arriba son uniformes (tal sería el caso de un túnel aerodinámico en circuito abierto que toma el aire de una atmósfera en reposo), la constante será idéntica en todas las líneas de corriente, e igual a la presión atmosférica en el recinto que contiene al túnel de viento.

El principio de Bernoulli es una consecuencia del principio de conservación de la cantidad de movimiento, pues en régimen incompresible, en ausencia de turbulencia y fricción, no puede haber pérdida de presión de remanso a lo largo de una línea de corriente. Las hipótesis que han permitido obtener esta sencilla relación entre presión estática y velocidad restringen su aplicación a aquellas regiones del dominio fluido en las que no sean dominantes los efectos viscosos o turbulentos, como es el caso de estelas y capas límites (donde habrá que recurrir a la ecuación de cantidad de movimiento).

Concretamente, se ha adquirido una columna de agua (Figura 2.26) de la marca Kimo con capacidad de medición de $200 \text{ mmH}_2\text{O}$, siendo el líquido manométrico requerido el AWS10 con densidad de $0,87/15^\circ$, no obstante, la ficha de características general puede verse en el Anexo B.5. Con el fin de mantener una posición vertical correcta de la columna de agua y a su vez, disponer de versatilidad de desplazamiento, se ha incorporado un sistema de fijación en la parte inferior mediante un soporte de acero inoxidable.



Figura 2.26. Columna de agua.



Inicialmente se tomaron las medidas directamente con el tubo de goma (Figura 2.27), comprobándose experimentalmente la afectación de la presión ejercida por los dedos de la mano al sujetarlo, aunque sea levemente, detectando pequeñas oscilaciones en los resultados gracias a la sensibilidad del instrumento de medición empleado que detecta las variaciones de la disminución de la sección de paso del aire y por tanto, proporcionaría falseamiento en las medidas.



Figura 2.27. Medición directa con la columna de agua.

Por consiguiente, con el objetivo de solventar las posibles deformaciones del tubo de goma y por tanto, evitar modificaciones en el flujo de aire que circula por su interior debido a la compresión, se decide acoplar un tubo de cobre a los dos tubos de goma (Figura 2.28), basado en el principio de funcionamiento del tubo de Pitot. Además, al insertar el tubo de cobre sobre el tubo de goma, se garantiza mediante la rigidez aportada por el metal de cobre la garantía de medir en la dirección deseada [95] en cada punto concreto de medición (Anexo A1).

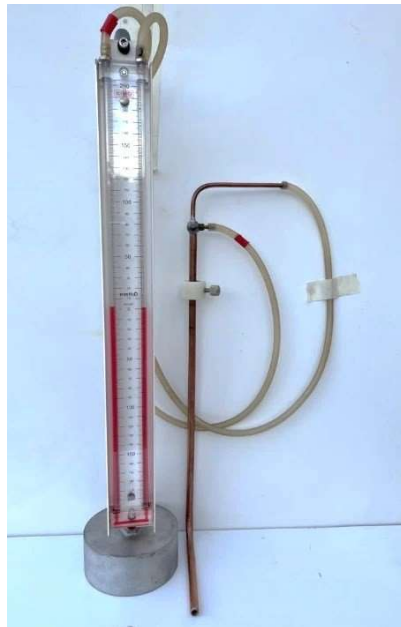


Figura 2.28. Columna de agua conectada al tubo de Pitot.



La construcción del tubo de Pitot (Figura 2.29a) se fundamenta en los criterios pautados por la normativa asociada al respecto según ISO 3966:2020 [96], de modo que se realiza con las consideraciones dimensionales y funcionales pertinentes.

La presión total se mide a través del orificio generado por el tubo principal, el cual se sitúa en el extremo opuesto a los 2 orificios conectados a las gomas de la columna de agua. Para realizar la medición es necesario situar el orificio perpendicular a la dirección del flujo de aire a analizar.

Por otro lado, sobre el propio tubo se practican los orificios pertinentes para medir la presión estática, tal y como pueden observarse en la Figura 2.29b.

En tercer y último lugar, se establece la presión dinámica, que es la que aparece en todos los resultados aportados en los ensayos empíricos, que es la mostrada por la columna de agua como resultante de la resta o la suma entre la presión total y la presión estática, como consecuencia de la aplicación del principio de vasos comunicantes al estar ambas presiones conectadas a la columna de agua.



Figura 2.29. Tubo de Pitot: a) vista completa; b) orificios que miden la presión estática.

Las mediciones realizadas con la columna de agua se obtienen en valores de presión de aire en unidades de mmH₂O. Pero debido a que en automoción es más habitual expresar el movimiento del flujo de aire en términos de velocidad, a continuación se explica la relación existente entre la presión y la velocidad, para hacer la conversión correspondiente a velocidad en unidades de km/h. La expresión teórica es:

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2.3)$$

siendo:



p : presión medida en columna de agua en Pa.

v : velocidade do aire en m/s.

ρ : densidade do aire en Kg/m^3 ($1,293 \text{ kg/m}^3$ en condicións normais a 0°C), obteniéndose o parámetro da seguinte relación:

$$\rho = \frac{p_{\text{atm}}}{R \cdot T} \quad (2.4)$$

onde:

p_{atm} : presión atmosférica (de 101.325 Pa a nivel do mar). Asimismo: $1 \text{ Pa} = 9,80664857 \text{ mmH}_2\text{O}$.

R : Constante de gas (aire): $287,05$.

T : Temperatura (K).

En la [Figura 2.30](#) se muestra la función teórica de presión y la velocidad, mostrando la correspondencia de cada mmH_2O con su correspondiente velocidad en km/h :

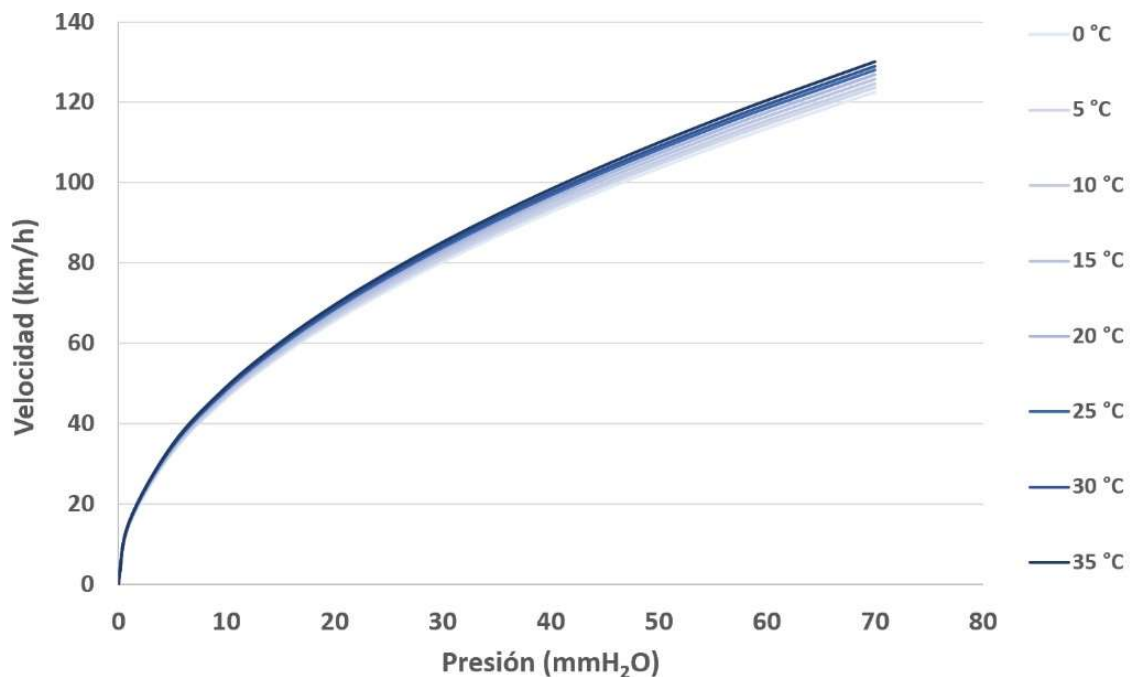


Figura 2.30. Función teórica presión-velocidad dependiente de la T^a .

En primer lugar, se comprobó la precisión de la columna de agua adquirida circulando con un coche en carretera y registrando los valores simultáneamente de la velocidad de circulación y la presión obtenida en la columna de agua, obteniendo la correlación mostrada en la [Tabla 2.3](#).



Tabla 2.3. Relación de la velocidad de circulación con la presión.

Velocidad circulación (km/h)	Presión columna de agua (mmH ₂ O)
60	20,0
70	26,5
80	34,0
90	42,5
100	51,5
110	62,0
120	74,0

De modo que en la [Figura 2.31](#) se compara gráficamente la función teórica ([Figura 2.30](#)) con la curva empírica que se obtiene de los valores recopilados en la [Tabla 2.3](#).

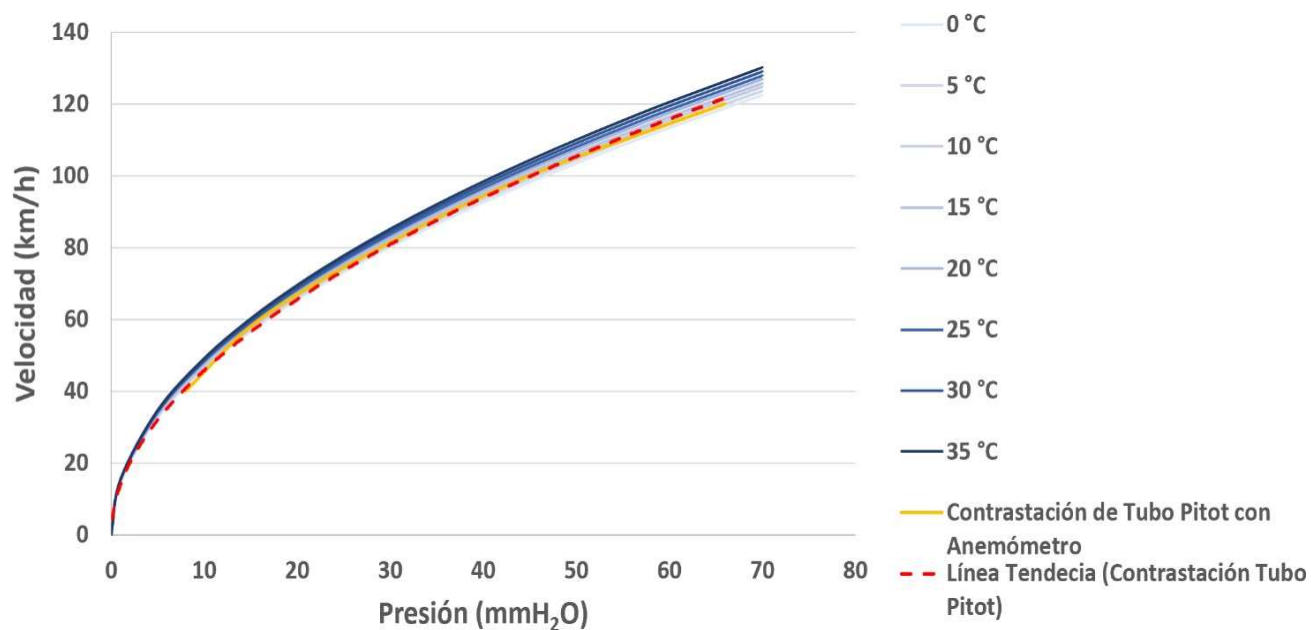


Figura 2.31. Función empírica presión-velocidad dependiente de la Tª.

Asimismo, se hizo una comprobación posterior cuando se terminó de construir el túnel de viento, de tal manera que se compararon las medidas tomadas con la columna de agua y un anemómetro digital en el interior de la cámara de ensayos, obteniéndose los mismos valores. Además, este sistema de verificación es más preciso respecto de las mediciones con el vehículo en circulación.



2.2.6. Análisis del túnel de viento

Para conseguir las condiciones adecuadas del flujo de aire a su paso por el interior de la cámara de ensayos, es necesario analizar las condiciones de funcionamiento del túnel aerodinámico construido.

De tal manera que el proceso comienza con la fase VIII de puesta en marcha del túnel de viento, en la que una vez terminado el ensamblaje de todos los componentes y, por tanto, finalizada la construcción del túnel de viento de la fase VII.I, estando ubicado dentro de una nave, el primer paso fue nivelarlo buscando la horizontalidad de la cámara de ensayos mediante un nivel.

El segundo paso fue realizar las conexiones eléctricas asociadas al ventilador de succión y al variador de velocidad que tiene integrado el propio ventilador. Seguidamente, se puso en marcha el túnel de viento y se comprobó que funcionaba correctamente, al no detectarse rozamientos, lo que implicaba ausencia de vibraciones y consecuentes ruidos.

A continuación, se analizó la funcionabilidad del túnel de viento (Fase IX), de tal manera que se procedió a examinar el comportamiento del flujo de aire en la cámara de ensayos, observándose que es laminar debido a que en toda la sección de la cámara de ensayos y a lo largo de toda su longitud, se consigue alcanzar la misma presión al medir con la columna de agua para cada uno de los tres niveles distintos de velocidad iniciales considerados (35, 41, 50 km/h) para realizar los testeos comparativos mediante el túnel de viento con configuración de succión.

No obstante, al optimizar posteriormente el túnel de viento para conseguir alcanzar velocidades superiores a los 50 km/h máximos iniciales, después de haber modificado el diseño del túnel al incorporar adicionalmente el ventilador de impulsión a la entrada según la fase VII.II, entonces hubo que volver a conectar todos los elementos, volver a nivelar horizontalmente el túnel aerodinámico respecto de la cámara de ensayos con un nivel y a su vez, hubo que volver a realizar la puesta en marcha del túnel, la cual resultó también satisfactoria.

De este modo, con la finalidad de variar la velocidad del flujo de aire suministrado por el ventilador impulsor, se recurre a incorporar a la instalación un variador de frecuencia ([Figura 2.32](#)) que permite que la variación de velocidad de giro de la hélice del ventilador de impulsión dentro del rango de velocidades de 0 a 1.500 r.p.m. se produzca de manera progresiva y uniforme, para así conseguir establecer en cada ensayo empírico las condiciones específicas de la velocidad de aire deseada como complemento al ventilador inicial de succión ([Tabla 2.1](#)).

En concreto se utiliza un variador de frecuencia de la marca Siemens modelo SED2-7,5/35B ([Anexo B.9](#)), que al ser de anclaje mural, se han acoplado unas patas en la parte inferior para poder apoyarse en el suelo y así facilitar su movilidad.

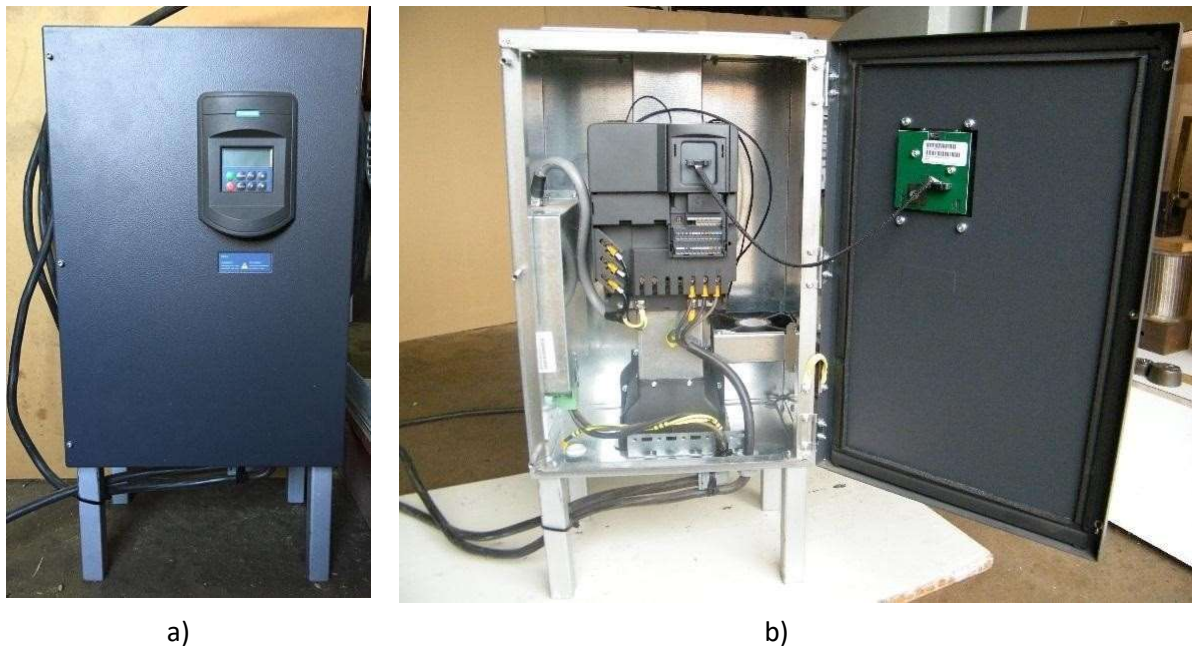


Figura 2.32. Variador de frecuencia.

El principio de funcionamiento de los variadores de frecuencia consiste en el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor, de modo que trabajan bajo la tesisura de que la velocidad síncrona de un motor de corriente alterna *CA* está determinada por la frecuencia suministrada y el número de pares de polos $2p$, lo que deriva en que un sistema de variador de frecuencia consta generalmente en un motor de corriente alterna, un controlador y una interfaz de operación.

Por un lado, el controlador de dispositivo de variación de frecuencia está formado fundamentalmente por un puente rectificador, que convierte la *CA* en corriente continua *CC* (Figura 2.33a). La tensión continua es convertida en una señal pseudosenoidal de *CA* usando un inversor conmutado. Asimismo, el rectificador es usualmente un puente trifásico de diodos, pero también se utilizan rectificadores controlados. Respecto a la inversión de la señal de *CC* en *CA* se suele emplear el transistor bipolar de puerta aislada, IGBT, que es un dispositivo semiconductor que generalmente se aplica como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia. Este dispositivo posee las características de las señales de puerta de los transistores de efecto campo con la capacidad de alta corriente y bajo voltaje de saturación del transistor bipolar, combinando una puerta aislada *FET* para la entrada de control y un transistor bipolar como interruptor en un solo dispositivo. El circuito de excitación del IGBT es como el del MOSFET, mientras que las características de conducción son como las del BJT.



La regulación de la velocidad a través de los IGBT es realizada actualmente en la mayoría de inversores por la técnica de modulación por ancho de pulsos, *PWM* (Pulse Width Modulation), mediante la cual los seis IGBT's se conectan y desconectan en una secuencia tal que producen una tensión en forma de pulsos cuadrados (Figura 2.33b).

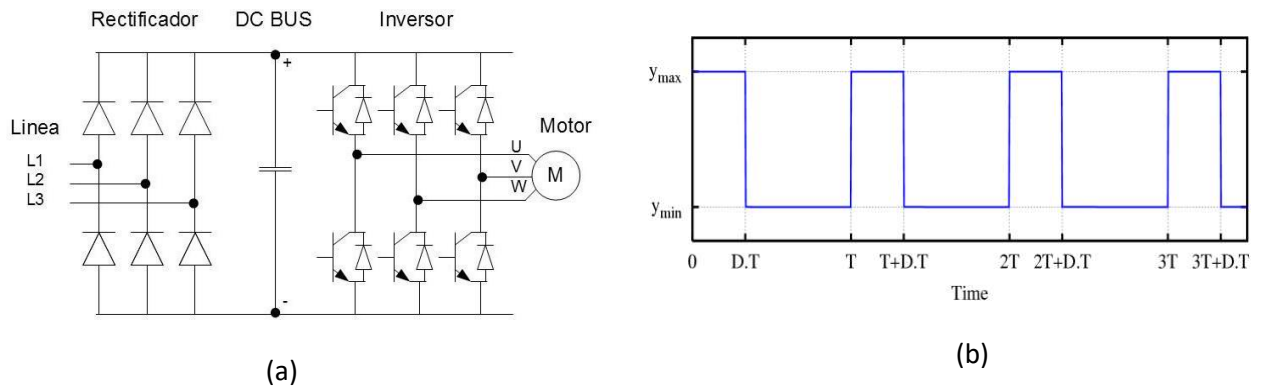


Figura 2.33. Variador de frecuencia: a) esquema del sistema; b) onda generada por el inversor.

Para variar la frecuencia del motor, el número de pulsos y su ancho se ajustan resultando en un tiempo de ciclo mayor para bajar la velocidad o tiempo de ciclo menor para subir la velocidad. De modo que el tiempo de ciclo de trabajo responde según la fórmula siguiente (2.5):

$$D = \frac{r}{T} \quad (2.5)$$

donde:

D: es el ciclo de trabajo

r: es el tiempo en que la función es positiva, ancho del pulso

T: es el período de la función

Para cada frecuencia específica hay un número óptimo de pulsos y anchos que producen la menor distorsión armónica en la corriente que se aproxime a la señal senoidal. El cambio de voltaje requerido para mantener la relación tensión-frecuencia constante conforme varía la frecuencia, se realiza por medio del microprocesador que controla el ancho de los pulsos y los demás parámetros para conseguir un adecuado funcionamiento.

En el arranque del variador se percibe el alcance del punto de sincronismo entre las revoluciones y el equilibrio del motor, zona en la que hay vibraciones, pero una vez superado este punto desaparecen dichas vibraciones.

Seguidamente, se analizaron nuevamente las condiciones del flujo de aire en el interior de la cámara de ensayos, de tal manera que se volvió a medir la presión mediante el tubo de Pitot acoplado a la columna de agua en la totalidad del área de la misma, obteniéndose en todos los puntos el mismo valor de presión en unidades de mmH₂O, lo que implica uniformidad y por tanto, el régimen del flujo



de aire en el interior de la cámara de ensayos es laminar. De modo que se han conseguido las condiciones necesarias del flujo de aire el cual alcanza una velocidad máxima de 76 km/h.

Definitivamente, se ha logrado diseñar y construir un túnel de viento abierto que al final es de succión e impulsión, con una cámara de ensayos cerrada que dispone de una sección útil de trabajo de 35 x 45 x 100 cm, sobre la que se proporciona una velocidad de flujo de aire máxima de 76 km/h en régimen laminar, con el que poder realizar los ensayos considerados para caracterizar el comportamiento del flujo de aire al incorporar el sistema de canalización aerodinámico a la maqueta de vehículo.

Por otro lado, los túneles de viento pueden ser clasificados de diferentes modos, según múltiples criterios, de modo que se considera a continuación el parámetro del rango de velocidades de operación y a su vez se tienen en cuenta sus diversas características.

En primer lugar, según el rango de velocidades, se puede realizar otra clasificación en función de la naturaleza del fluido con el que se trabaja en el túnel de viento:

- (i) Flujo incompresible: definido como aquel en el que los cambios en la densidad del cuerpo son muy pequeños y en el aire se considera este régimen cuando la velocidad del mismo es menor a un valor de Mach de 0,3, así que la aproximación de aerodinámica incompresible es válida hasta una velocidad del aire de unos 100 m/s (equivalente a 360 km/h). Lo que implica que es la situación que se tiene en los presentes ensayos empíricos desarrollados, al alcanzar el aire una velocidad máxima de 76 km/h.
- (ii) Flujo compresible: los cambios en la densidad sí son apreciables por lo que se deberán tener en cuenta en aquellas circunstancias que tenga cabida. En este tipo de régimen se tratan problemas aerodinámicos en los que el aire va a una velocidad mayor a un valor de Mach de 0,3, es decir, una velocidad superior a 100 m/s aproximadamente.

En segundo lugar, se tiene en cuenta la velocidad del flujo de aire a su paso por la sección de la cámara de ensayos, considerando como referente el número de Mach que clasifica los túneles de viento en cuatro tipos distintos según se indica en la [Figura 2.34](#).



Tipo de túnel	Número de Mach	Sección de entrada
Subsónico	0 – 0,7	
Transónico	0,7 – 1,2	
Supersónico	1,2 - 5	
Hipersónico	>5	

Figura 2.34. Categorización túneles de viento.

- (i) Los túneles de viento subsónicos o de baja velocidad son el tipo de túnel de viento más común y es la tipología del túnel construido para la presente investigación, debido a que el fluido se considera incompresible, lo que conlleva a tener un número de Mach inferior a 0,3 perteneciente al rango entre 0 y 0,7 asociado a régimen de velocidad subsónico.
- (ii) Los túneles de viento transónicos son los empleados en la industria aeronáutica.
- (iii) La categoría de tipo supersónico se utiliza en la investigación militar.
- (iv) Los túneles de viento de tipo hipersónico son los requeridos en transbordadores espaciales.

Finalmente, el túnel aerodinámico construido se clasifica como un túnel de ciclo abierto con sección de ensayos cerrada, con régimen de velocidad subsónico y flujo incompresible.

2.2.7. Sistema de medición

A continuación, se explica el proceso llevado a cabo para realizar los diferentes ensayos empíricos, la justificación de todos y cada uno de los puntos de medida seleccionados, así como la ejecución de las diversas mediciones. En primer lugar, se posiciona la maqueta del vehículo que se ha construido para tal fin en el interior de la cámara de ensayos, la cual puede abrirse y cerrarse fácilmente mediante la tornillería de la parte superior y laterales (Figura 2.15).

Con el objetivo de analizar el comportamiento del aire en la zona posterior al vehículo, es necesario que la maqueta modelo permanezca inmóvil [97] durante la realización de las pruebas experimentales [98], para lo cual se procede a lastrar la maqueta mediante un lingote de hierro de



3,22 kg (Figura 2.35), de modo que el flujo de aire proporcionado por el túnel aerodinámico, el cual incide sobre la maqueta, es el único elemento que dispone de capacidad de movimiento.



Figura 2.35. Maqueta lastrada.

De este modo, el análisis de efectividad del sistema de canalización aerodinámico ideado se va a cuantificar midiendo las variaciones de presión del flujo de aire en la parte trasera de la maqueta del vehículo [99] debido a que es la zona que se ve afectada por el sistema deflector a incorporar encima del techo del vehículo, ya que permite la canalización del aire por el interior de la cavidad conformada, facilitando así su expulsión en el final longitudinal del vehículo, correspondiéndose con la zona posterior (Figura 1.1b).

Tras analizar diversas alternativas para ponderar las variaciones que se producen en el flujo de aire en la estela posterior del vehículo [100-102], se decidió utilizar como instrumento de medida la columna de agua [103], fundamentalmente por factores tales como la precisión, la versatilidad que proporciona y el coste asociado. Asimismo, cabe destacar que permite realizar las mediciones con las mismas condiciones tanto con el sistema de canalización aerodinámico acoplado como sin él, y así poder comparar objetivamente ambas circunstancias. De modo que, según se ha explicado en el apartado correspondiente de metrología, a los tubos de goma de la columna de agua se les ha acoplado un tubo de Pitot para garantizar la estabilidad de la sección disponible por la que fluye el aire en su interior.

El siguiente paso ha sido definir los puntos necesarios de medición para determinar la estela del aire y, así, poder analizar la influencia de incorporar o no el sistema deflector. De esta manera, los puntos seleccionados para realizar las mediciones se establecen en un mismo plano, con el fin de medir en distintos puntos de la zona posterior del vehículo con una misma distancia común respecto de la terminación del automóvil.

En la Figura 2.36 se observa el plano sobre el que se mide en los 9 puntos, los cuales están referenciados a un sistema de coordenadas XYZ [104], de modo que el eje X representa la distancia de separación respecto del final del vehículo, el eje Y la altura a la que se mide respecto del suelo y el eje Z referencia la distancia transversal cuyo origen se sitúa en el borde lateral de la maqueta.

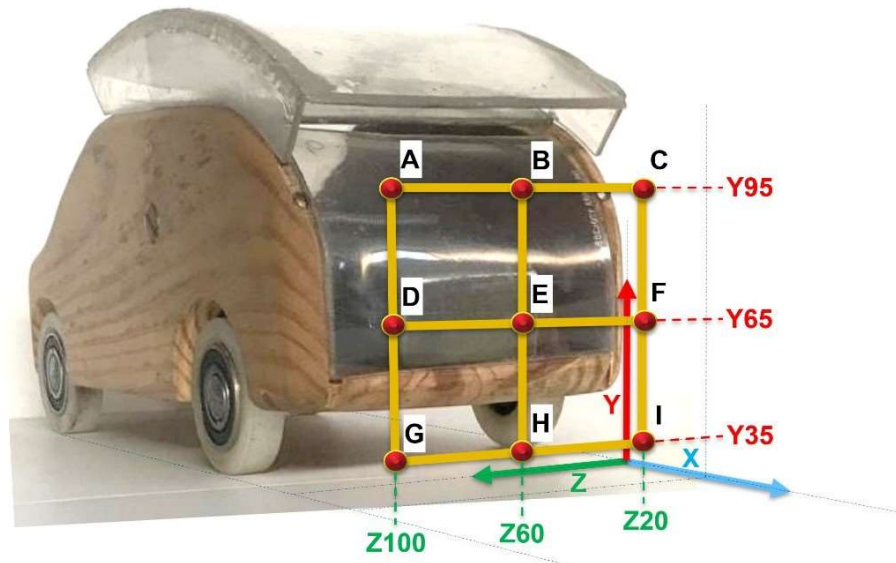


Figura 2.36. Plano de medición referenciado a los ejes YZ.

El proceso de selección de los puntos de medida comienza estableciendo 3 puntos sobre el eje Z, de tal manera que en primer lugar, se define el punto central de la parte posterior y debido a que la maqueta tiene una anchura de 120 mm, entonces se fija en 60 mm respecto del origen del eje Z al corresponderse con la mitad de la anchura. Asimismo, se considera necesario crear otros 2 puntos de medida equidistantes al central, basando la elección de estas distancias en que tienen que situarse en el interior de la estela de la maqueta sin llegar a verse afectados por el aire del flujo lateral exterior, ya que desvirtuaría las mediciones, y a su vez es preciso que estén lo más lejanas posible respecto del punto central, de modo que tras ensayos previos, se definieron en 20 mm y 100 mm en referencia al origen del eje Z, quedando estos 2 puntos de medida en Z20 y Z100 respectivamente, los cuales son equidistantes a 40 mm respecto del punto central inicial que se ha situado a 60 mm, de modo que su coordenada se denomina Z60.

Seguidamente, se definen los puntos de medición del eje Y. Por un lado, se considera adecuado empezar a medir a partir de 35 mm respecto del suelo donde se coloca la maqueta (origen del eje Y), ya que en el tramo desde el suelo hasta esta altura de 35 mm las mediciones no serían válidas al verse afectadas por el aire que llega por debajo del vehículo. De esta manera, Y35 se corresponde en la maqueta con la altura a la que comienza el metacrilato (Figura 2.36).

Por otro lado, se define la altura más alta a 95 mm, de manera que quede por debajo de la terminación del sistema deflector, teniendo en cuenta que éste se sitúa a una altura de 110 mm, lo que permite medir el flujo de aire canalizado, con un margen de separación 15 mm, lo que implica que la altura más alta sobre el eje Y queda establecida en 95mm, lo que equivale a la coordenada Y95. Finalmente, se establece el tercer punto de medida de modo que sea equidistante a los 2 puntos previos, Y35 e Y95, resultando Y65.



Por consiguiente, en la [Figura 2.36](#) quedan definidos los 9 puntos de un plano de medición, de modo que en el eje Z se establecen 3 puntos de medida referenciados a las coordenadas Z20, Z60 y Z100, junto con otros 3 puntos de medida asociados al eje Y, en las coordenadas Y35, Y65 e Y95. Por tanto, el conjunto de coordenadas citadas, constituyen un plano de medición formado por una matriz de 3x3 con 9 puntos a los que se denomina A, B, C, D, E, F, G, H, I respectivamente según la [Tabla 2.4](#), con el objetivo de facilitar la identificación de los puntos de medición y la posterior interpretación de los resultados obtenidos en los diversos ensayos empíricos.

Tabla 2.4. Puntos del plano de medición.

	Z100	Z60	Z20
Y95	A	B	C
Y65	D	E	F
Y35	G	H	I

Asimismo, se ha establecido que se tiene que medir a diferentes distancias respecto del final del vehículo (eje X), para determinar la estela del flujo de aire y así poder analizar con más variables la influencia de incorporar o no el sistema de canalización aerodinámico, de modo que las distancias que se han considerado para medir respecto del final de la maqueta modelo son 1, 5, 10, 20, 30, 40 y 50 cm ([Figura 2.37](#)). Lo que significa que a cada una de estas 7 distancias se realizan las 9 mediciones que constituyen cada plano y a su vez, conlleva a disponer de 7 planos de medición: X1, X5, X10, X20, X30, X40 y X50 para cada velocidad. Esta denominación tiene lugar al quedar referenciado cada plano respecto del eje X, de modo similar a la identificación de coordenadas en los ejes Y y Z.

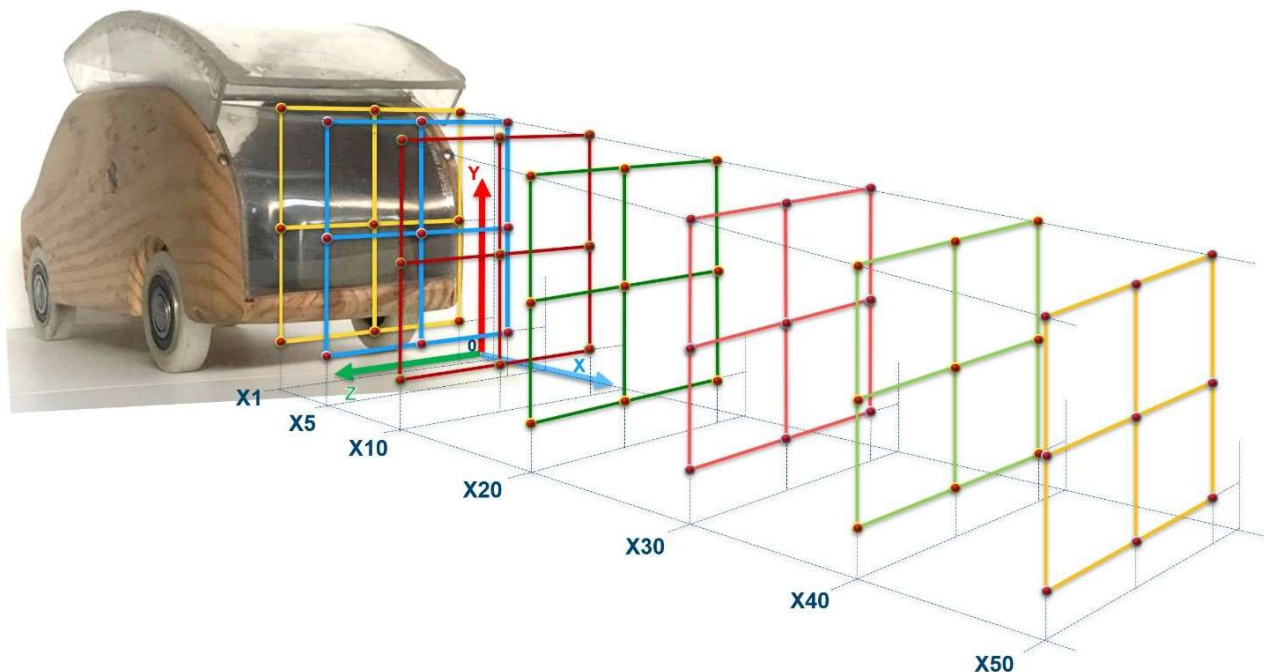


Figura 2.37. Planos de medición referenciados en el eje X.



Como último paso, todas las mediciones se repiten a 6 velocidades diferentes, siendo suministradas por el túnel de viento a un flujo laminar en la totalidad de la cámara de ensayos, con el objetivo de analizar también cómo influye la velocidad de circulación en la eficiencia del sistema de canalización aerodinámico propuesto.

Las velocidades seleccionadas son: 36 km/h (equivalente a 6 mmH₂O), 42 km/h (equivalente a 8 mmH₂O), 52 km/h (equivalente a 12 mmH₂O), 65 km/h (equivalente a 19 mmH₂O), 71 km/h (equivalente a 22 mmH₂O) y 76 km/h (equivalente a 26 mmH₂O).

El criterio para establecer estos 6 valores de velocidad se fundamenta, en primer lugar, en que la máxima velocidad que puede suministrar el túnel de viento considerando simultáneamente el ventilador de succión más el ventilador de impulsión, considerando la garantía permanente de que el flujo de aire tenga las condiciones adecuadas de régimen laminar en la totalidad de la cámara de ensayos, es de 76 km/h. Por tanto, el valor de 76 km/h se establece como necesario para evaluar a la maqueta al máximo valor de velocidad alcanzable.

Por el contrario, se pauta un valor de velocidad mínimo de 36 km/h, basando esta selección en mediciones previas en las que se observó que por debajo de 36 km/h los valores de presión obtenidos eran menos relevantes.

Con la finalidad de analizar en mayor medida la evolución de la influencia de la velocidad del flujo de aire incidente en el comportamiento del aire al incorporar el sistema deflector, se realizan ensayos a otras 4 velocidades intermedias respecto de las 2 velocidades ya definidas como máxima y mínima. No obstante, no se obtienen valores medios debido a que la selección individual se hizo en referencia a términos de presión y posteriormente se realizó la conversión a términos de velocidad.

Se han dispuesto 378 puntos de medición, lo que implica la necesidad de establecer una taxonomía que permita identificar de una forma sencilla las principales variables de cada punto de medición. Esta se ha establecido como P-QQ-RR, donde P es el punto de medición, con sus correspondientes distancias en el eje Y y eje Z ([Figura 2.36](#)), QQ es la distancia sobre el eje X ([Figura 2.37](#)) y por último RR es la velocidad del aire proporcionado por el túnel aerodinámico. Esta tabla se adjunta en el [Anexo A1](#).

En la [Figura 2.38](#) se muestra el posicionamiento de la maqueta así como el de la columna de agua como instrumento de medida, en el interior de la cámara de ensayos, correspondiente a la parametrización de la Fase VII.I en la que únicamente se instaló el ventilador de succión, alcanzándose una velocidad máxima de 50 km/h. La maqueta se posicionó en el centro longitudinal de la cámara de ensayos, al ser la posición ideal basándose en el comportamiento del flujo de aire que presenta mayor homogeneidad en la parte central. Dicha disposición permitió medir las presiones en la parte posterior de la maqueta a una distancia máxima respecto del eje X de 27 cm, es decir, en el plano de medición X27.

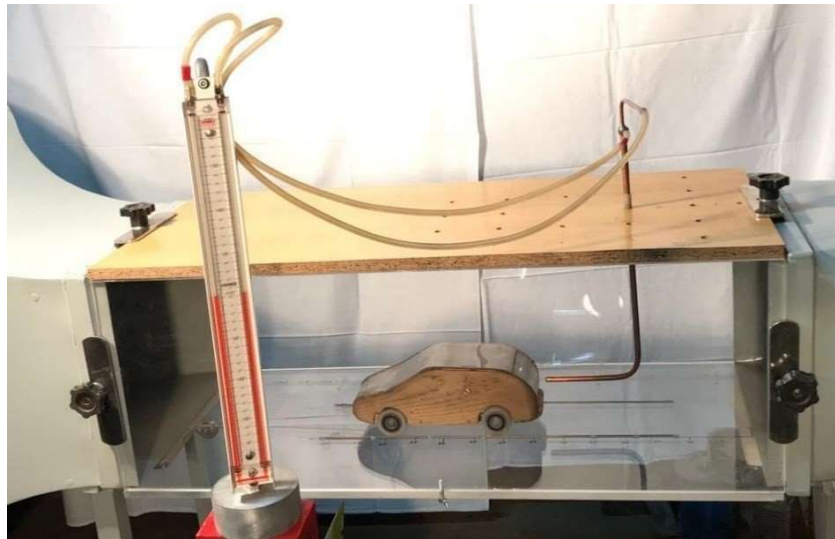


Figura (Figura 3.13b). Posicionamiento del sistema de medición en la fase VII.I.

Sin embargo, con el objetivo de analizar el comportamiento del aire a velocidades superiores a 50 km/h se desarrolló la Fase VII.II en la que, además de incorporar adicionalmente el ventilador impulsor consiguiendo una velocidad de hasta 76 km/h, se pretendía evaluar el efecto del sistema de canalización aerodinámica a distancias superiores de la pauta por el plano X27. Esto se ha planteado porque en los ensayos a velocidades inferiores a 50 km/h se comprobó que en dicho plano no confluían las respectivas curvas con y sin el sistema deflector.

De este modo, en los posteriores ensayos empíricos objeto de la presente tesis ha sido preciso modificar la posición de la maqueta, adelantándola en el sentido del cono de contracción, de modo que se estableció el plano X50 como la máxima distancia a la que se puede medir respecto de la parte trasera de la maqueta modelo, ya que la longitud total de la cámara de ensayos es de 1 m y hay que considerar la propia longitud de la maqueta, así como la longitud de la terminación del tubo de Pitot (Figura 2.39). No obstante, se mantiene el régimen laminar en el flujo de aire tal y como se indica en el apartado 2.2.6 correspondiente a análisis de túnel de viento.



Figura 2.39. Posicionamiento del sistema de medición en la fase VII.II.



Por otro lado, con el objetivo de introducir fácilmente el tubo de Pitot en la cámara de ensayos, así como para favorecer su extracción y a su vez, garantizar el mismo posicionamiento del instrumento de medida en cada punto de medición ([Anexo A1](#)), la pared superior de la cámara de ensayos es un tablero de madera en vez de metacrilato, al que se han practicado 21 taladros según la [Figura 2.40](#).

La correspondencia se basa en que cada una de las 7 columnas de taladros, representa las diversas distancias en el eje X respecto del final de la maqueta, referenciándose cada una de ellas con un plano del eje X (X1, X5, X10, X20, X30, X40 y X50). Asimismo, hay 3 filas, las cuales representan los puntos de medición sobre el eje Z, es decir, las coordenadas Z20, Z60 y Z100 respectivamente.

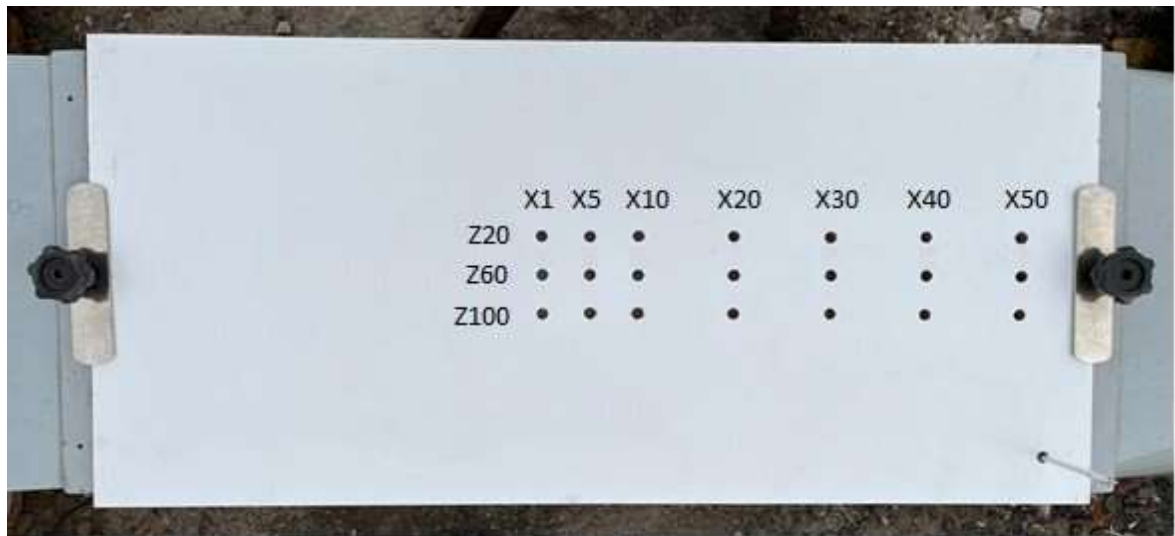


Figura 2.40. Referencias de los puntos de medición en la cámara de ensayos.

Asimismo, con el fin de referenciar las 3 alturas pautadas para el eje Y, se ha dibujado una marca con rotulador negro en el propio tubo de Pitot ([Figura 2.41](#)) a las distancias correspondientes para Y35, Y65 e Y95, de tal manera que el tubo de Pitot se introducirá en el interior de la cámara de ensayos hasta cada uno de los puntos referenciados en función de la medida que se quiera tomar en cada momento. Por consiguiente, el proceso requiere que en cada uno de los 21 taladros se realicen 3 medidas distintas para cada una de las 6 velocidades.



Figura 2.41. Marcas de referencia en tubo de Pitot.

De esta manera, en cada velocidad hay 63 puntos de medida, lo que conlleva a ejecutar 126 mediciones en cada una de las velocidades debido a que se realizan las mediciones con la maqueta



convencional sin el sistema de canalización aerodinámico. En paralelo, también se hacen las mediciones con el sistema incorporado, con la finalidad de comparar cuantitativamente el efecto aportado por el mismo bajo las mismas condiciones. Este proceso, al repetirse para cada una de las 6 velocidades, conlleva realizar un total de 756 mediciones individuales ([Anexo A1](#)) e implica a nivel global realizar 36 mediciones en cada uno de los 21 taladros.

Por último, el sistema de medición se completa con la utilización de un termómetro de laboratorio de mercurio que se posiciona en el interior de la cámara de ensayos ([Figura 2.42](#)) para registrar las mediciones de la temperatura en el interior de la misma para cada una de las 6 velocidades de ensayo y así poder valorar la posible afectación de la temperatura en el proceso de medición y resultados obtenidos.



Figura 2.42. Termómetro.

Se ubica el termómetro en la parte final de la cámara de ensayos próximo al cono difusor y a su vez cercano a una de las esquinas para interferir lo mínimo posible en el flujo ([Figura 2.43](#)).



Figura 2.43. Posicionamiento del termómetro.

Cabe indicar finalmente que los requerimientos del proceso de medición descritos en el presente apartado son igualmente válidos tanto para la configuración del túnel de viento con el ventilador de succión únicamente, como para la disposición del ventilador de succión más el complemento del ventilador de impulsión.



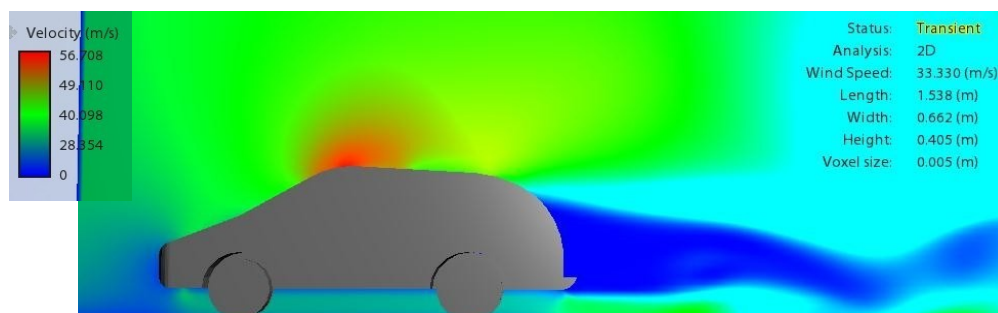
3. RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados (Fase VIII) de los dos métodos principales utilizados para realizar la investigación, de modo que, se indican en primer lugar los resultados obtenidos de la simulación computacional y, en segundo lugar, se exponen los resultados conseguidos en los diversos ensayos experimentales.

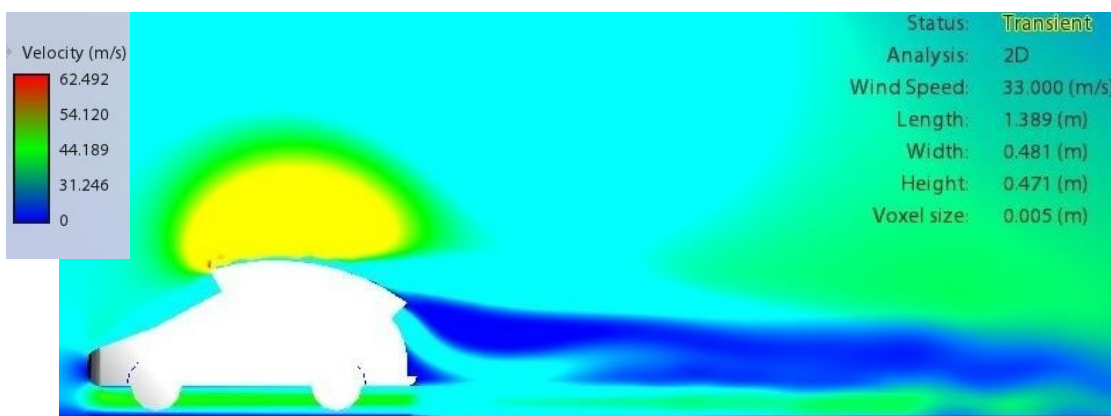
3.1. Simulación computacional

En primer lugar, se indican los resultados de las simulaciones de dinámica de fluidos computacional realizadas mediante el software Autodesk Flow Design®. En la [Figura 3.1a](#) se observa la maqueta del vehículo convencional situada en el simulador de un túnel de viento, sobre la que incide aire con una velocidad de 33 m/s, de modo que la estela que deja el vehículo en su avance es azul oscura en su totalidad, cuyos valores son próximos a cero.

Sin embargo, en la [Figura 3.1b](#) la maqueta tiene incorporada el sistema deflector en la parte superior. Al nuevo conjunto de maqueta y deflector, se somete en el simulador a la misma condición de aire incidente de 33 m/s (equivalente aproximadamente a la velocidad de 120 km/h que es la máxima permitida para circular en carreteras españolas), en cuyo caso, se puede ver en la estela el flujo de aire que consigue aportar el sistema de canalización a la zona posterior del vehículo, reflejado en color azul claro. Se debe a que efectivamente el aire fluye por el interior de la cavidad formada por el deflector, y a la salida del sistema de canalización, el aire desciende rellenando la zona de vacío.



a)

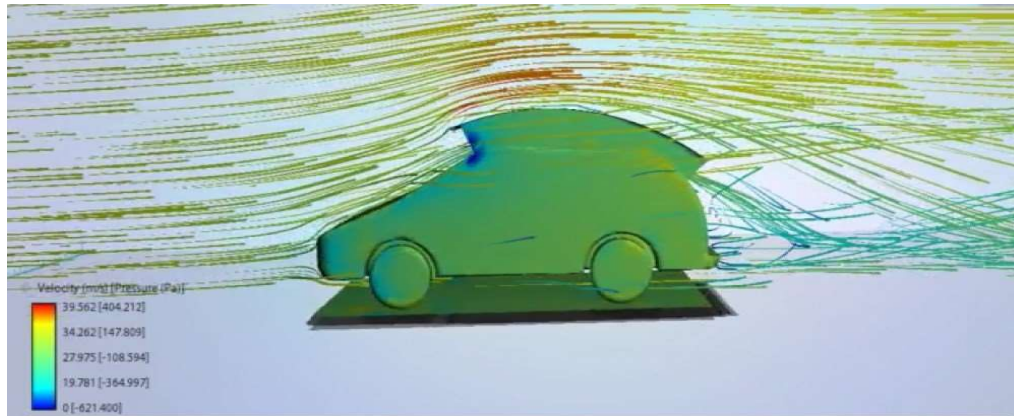


b)

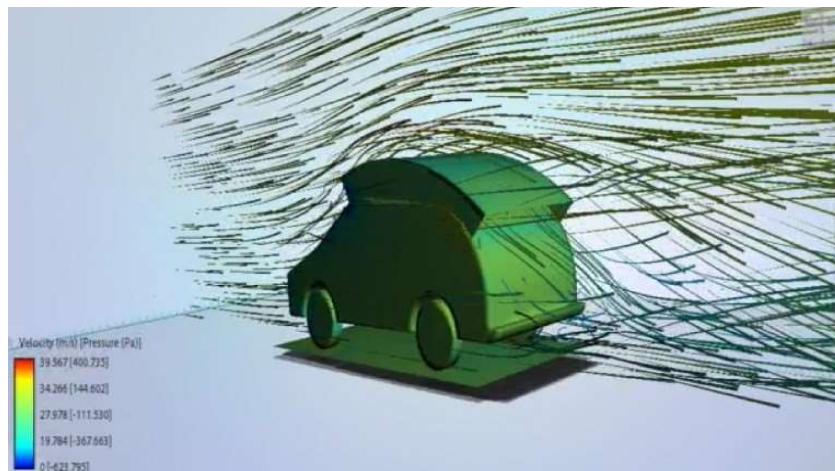
Figura 3.1. Estela de vehículo: a) sin deflector; b) con deflector.



Asimismo, en la [Figura 3.2](#) se observa con mayor detalle la dirección de las líneas del flujo de aire en la simulación aerodinámica computacional, en la que se observa al vehículo con el deflector incorporado, de modo que, tanto en la vista lateral ([Figura 3.2a](#)) como en la vista de perspectiva posterior ([Figura 3.2b](#)), se aprecian las líneas de flujo de aire que entran por el interior de la cavidad que constituye el deflector. A su vez, a la salida del deflector se observa la trayectoria de las líneas de flujo, las cuales descienden hacia la zona posterior de vacío por el redireccionamiento al que se ven sometidas por la forma convexa del deflector.



a)



b)

Figura 3.2. Líneas de flujo con deflector: a) vista lateral; b) perspectiva trasera.

3.2. Ensayos empíricos

A continuación, se presentan los datos recogidos de los diversos ensayos experimentales realizados, los cuales se presentan clasificados por velocidades, de modo que, para cada uno de los 7 planos analizados en cada velocidad ([Figura 2.37](#)), se aporta una tabla con los valores asociados a las condiciones de ensayo y, a su vez, otra tabla en la que se indican los resultados numéricos en términos de presión y en términos de velocidad para cada punto de medición. Además, todos los datos se visualizan en una gráfica de superficie 3D en términos de velocidad para facilitar la comprensión del comportamiento del aire.



Asimismo, se presentan en cada página de manera paralela, los resultados de cada plano para cada una de las 6 velocidades. Por un lado, los resultados asociados a la maqueta sin el sistema de canalización aerodinámico (denotado por Figura a) y por otro lado, considerando que se ha incorporado el sistema deflector (denotado por Figura b), con el fin de optimizar la comparativa por plano al ser más visual y así facilitar su valoración.

3.2.1. Velocidad de 36 km/h

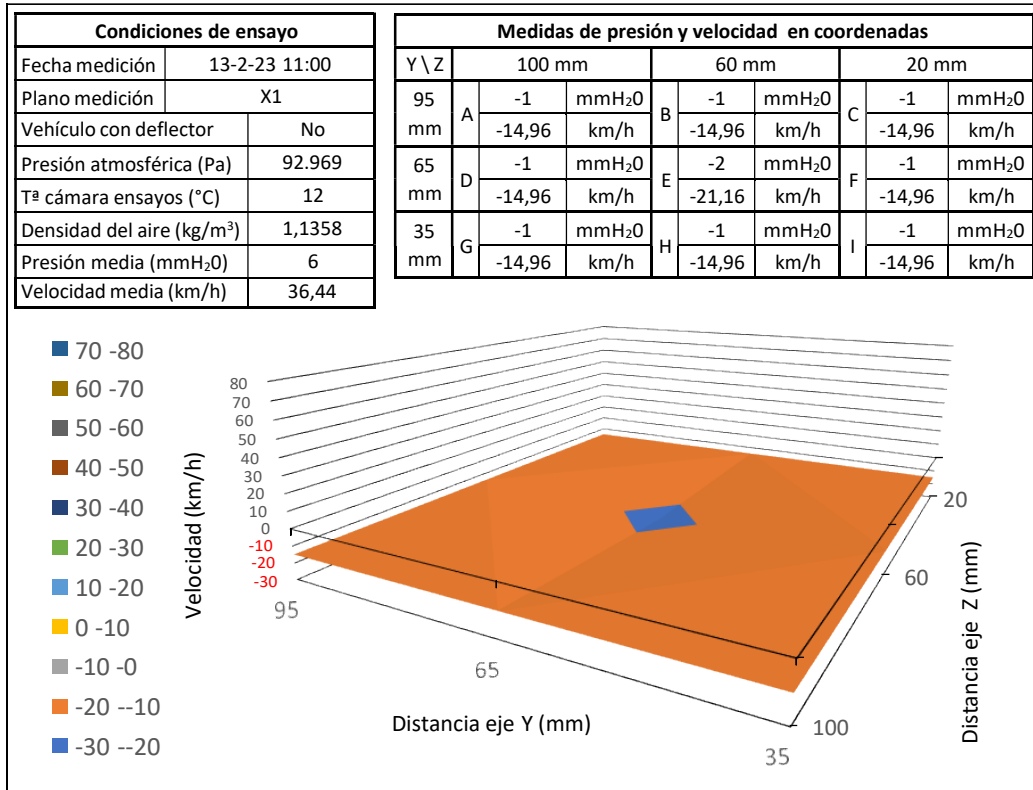
Considerando el vehículo sin el sistema deflector en los planos más próximos a la parte posterior de la maqueta del vehículo, es decir, X1 (Figura 3.3) y X5 (Figura 3.4), existen presiones negativas que se incrementan ligeramente en la parte central del plano, correspondiente al punto E (Figura 2.36). Dicho punto es el que se encuentra más distante de todas las corrientes de los flujos, tanto superior como de ambos laterales, lo que conlleva a que se genera más vacío y por consiguiente, sea más difícil de rellenar. Sin embargo, respecto al plano X1 con deflector (Figura 3.3b), se observa que en su totalidad se consigue un plano positivo, siendo más significativo en la parte superior, es decir, en los puntos A, B y C (según el plano de medición de la Figura 2.36), donde se aprecian las aportaciones del flujo procedente del deflector y se ve en la zona azul oscura cómo está más concentrado en el punto B central desde donde va perdiendo velocidad a medida que el flujo se proyecta hacia la zona representada en verde (punto E), donde se nota aún el mayor aporte de flujo en su parte central y cómo se dispersa referente al eje Z, difuminándose al llegar a Y35 (G, H, I).

Por otro lado, en el plano X5 con deflector (Figura 3.4b) todas las presiones son positivas siendo la parte central la que presenta mayor magnitud, llegando a alcanzar en el punto B el valor de la velocidad aportada por el túnel de viento (36,64 km/h). A medida que el aire canalizado por el sistema deflector desciende respecto del eje Y, es decir, al desplazarse de la coordenada Y95 a la coordenada Y65 y posteriormente descender hasta Y35, se observa la formación de una “V” lo que significa que el flujo central que es el más fuerte, va perdiendo velocidad al ir rellenando la zona inferior, uniéndose al flujo de los laterales.

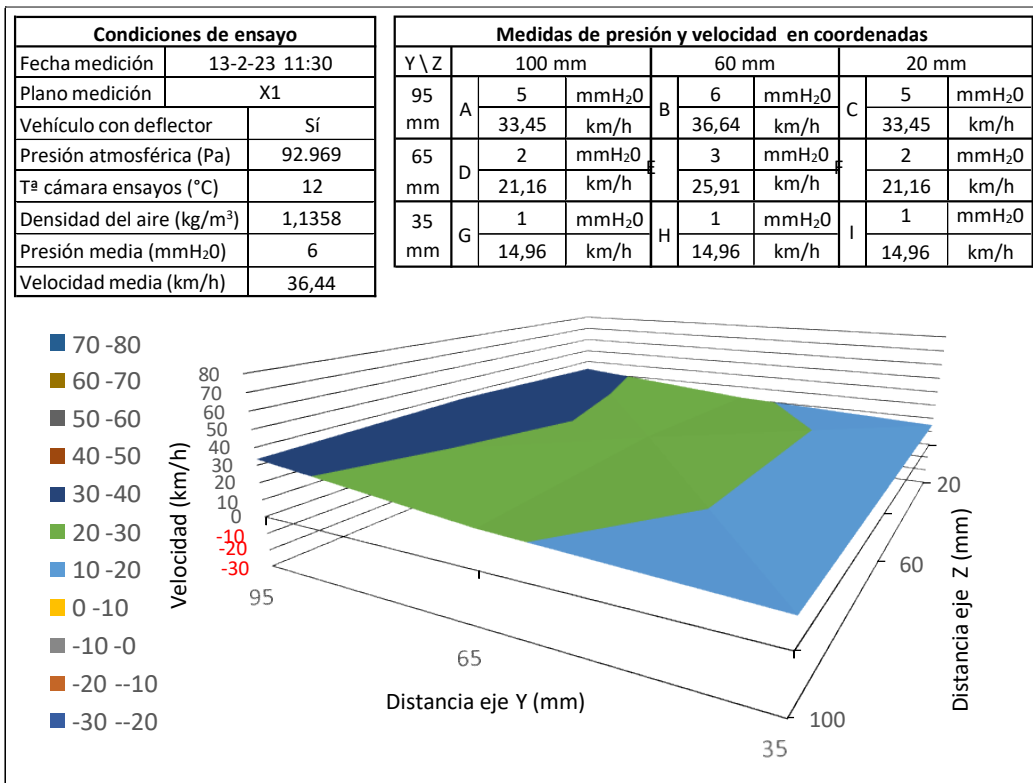
A partir del plano X10 (Figura 2.37) en el vehículo sin deflector (Figura 3.5a), la presión empieza a incrementarse de forma lineal debido al aumento de distancia respecto del final de la maqueta. La gráfica del plano X10 con deflector (Figura 3.5b) pone de manifiesto la eficacia del propio sistema incorporado dado que prácticamente tiene la velocidad aplicada en todos los puntos de medida.

En el plano X20 sin deflector (Figura 3.6a) se unifican las presiones en el rango de 20-30 km/h asociado al color verde, no obstante, al acoplar el sistema de canalización aerodinámico, la totalidad de las presiones se igualan al aire exterior proporcionado por el túnel de viento, cuyo efecto se mantiene en los planos posteriores de X30 (Figura 3.7), X40 (Figura 3.8) y X50 (Figura 3.9). Respecto al vehículo con el deflector (Figura 3.6b), la presión es más elevada, sobre todo en la coordenada Y95 (puntos A, B y C), donde se aprecian las aportaciones de entrada de aire procedente del deflector.

Al comparar generalmente los 7 ensayos con un suministro de aire entrante de 36 km/h, se refleja la ventaja del sistema de canalización aerodinámico al proporcionar valores de presión superiores (o al menos de igual magnitud) en todos los puntos de todos los planos.

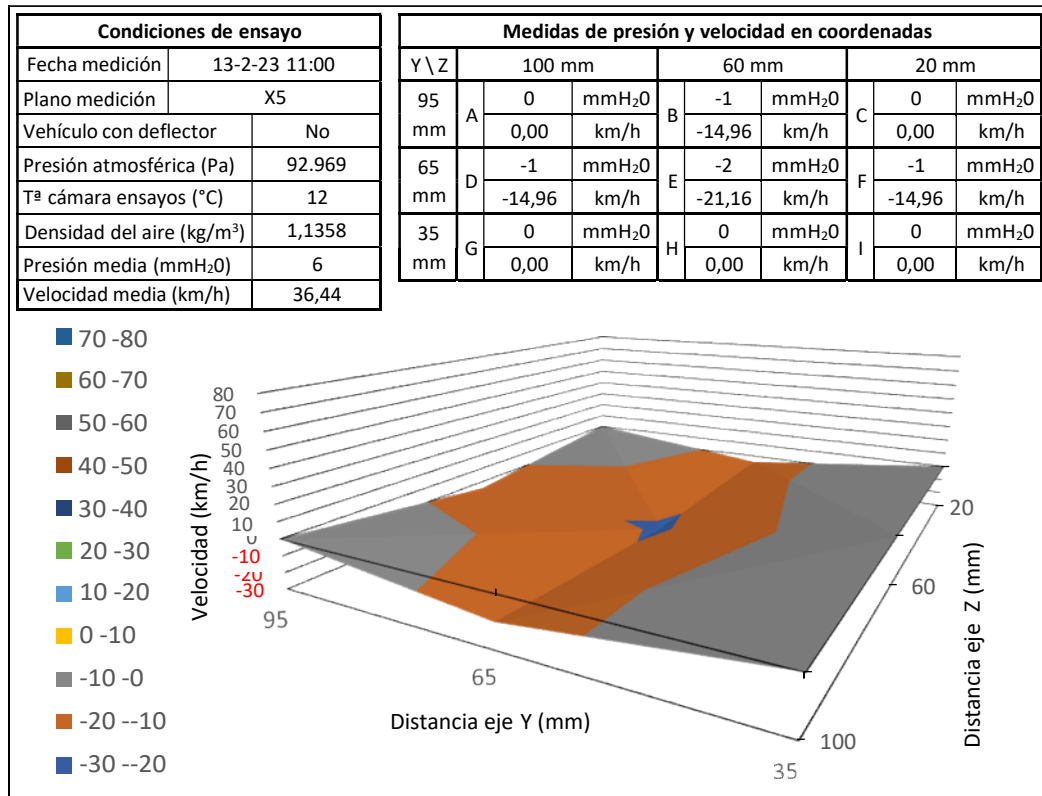


a)

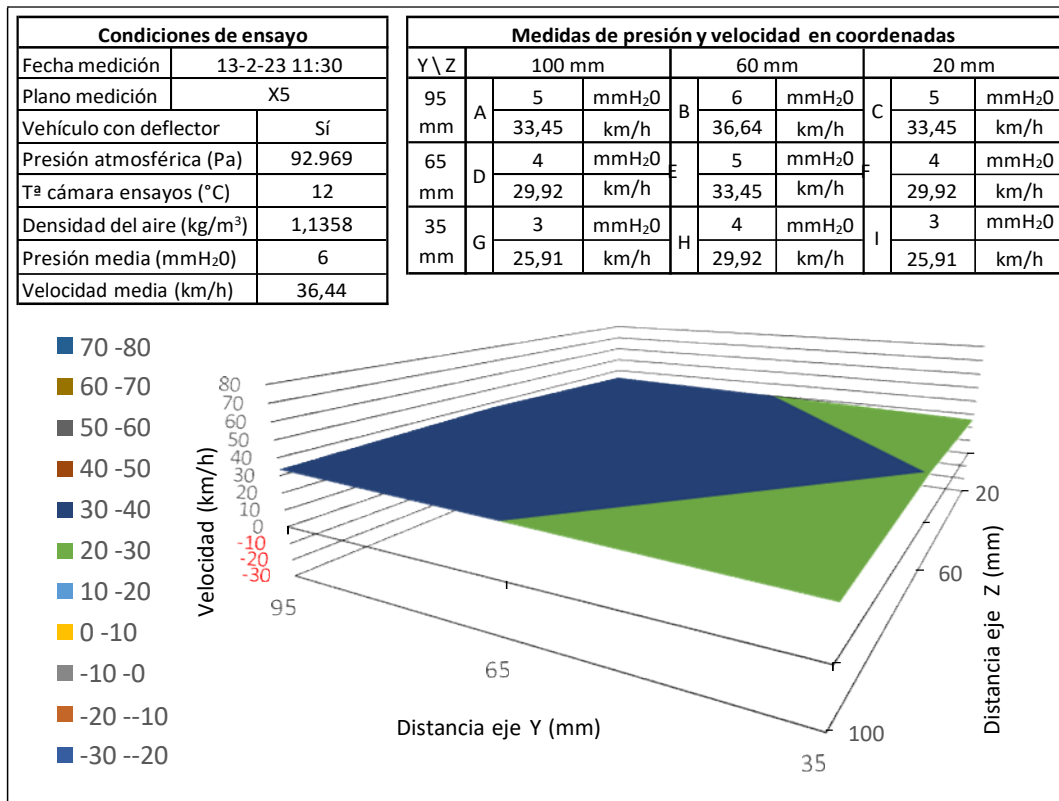


b)

Figura 3.3. Resultados en plano X1: a) sin deflector, b) con deflector.

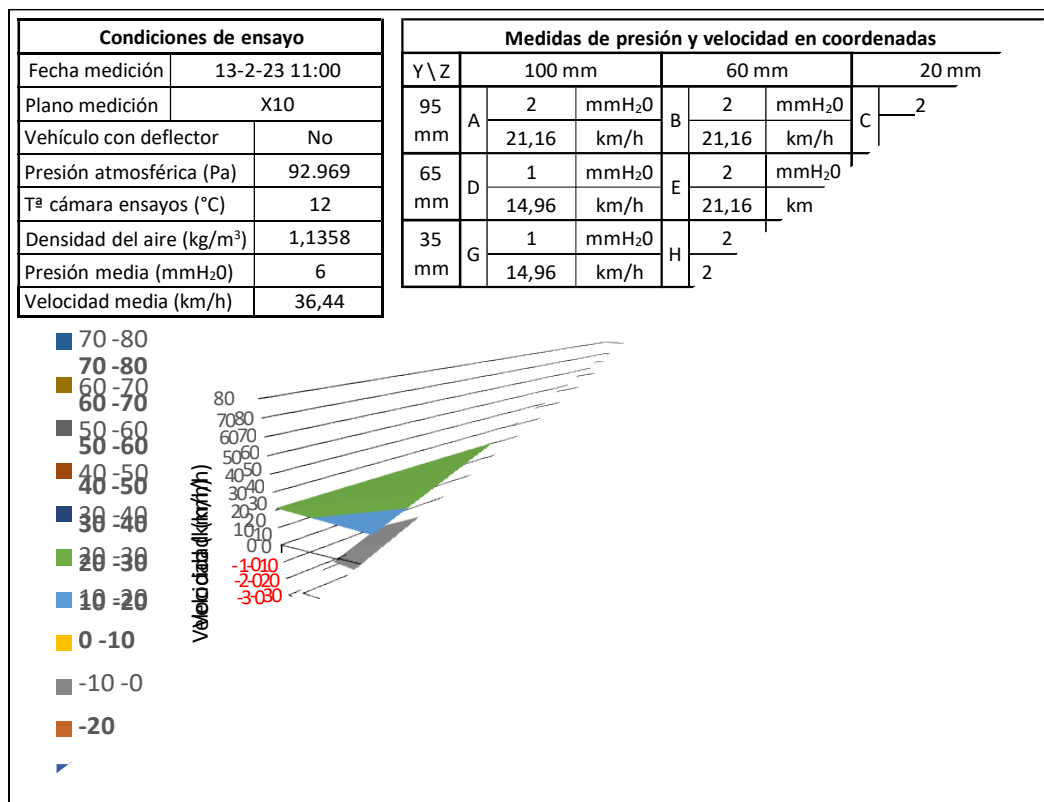


a)

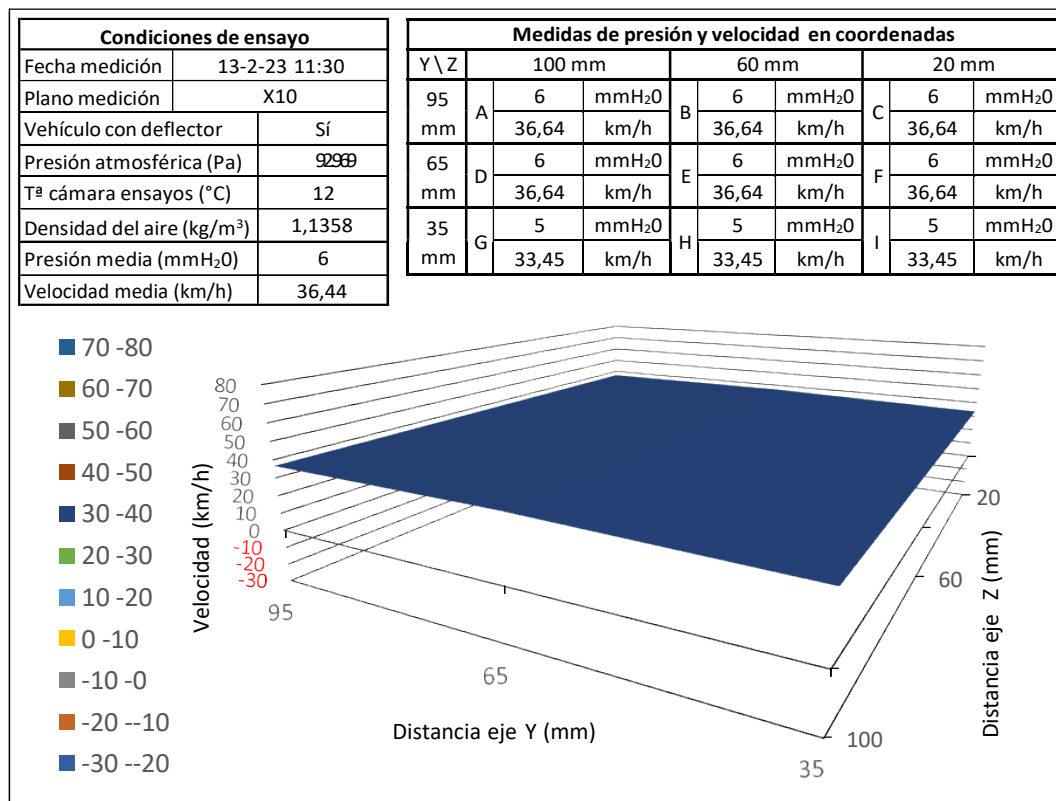


b)

Figura 3.4. Resultados en plano X5: a) sin deflector, b) con deflector.

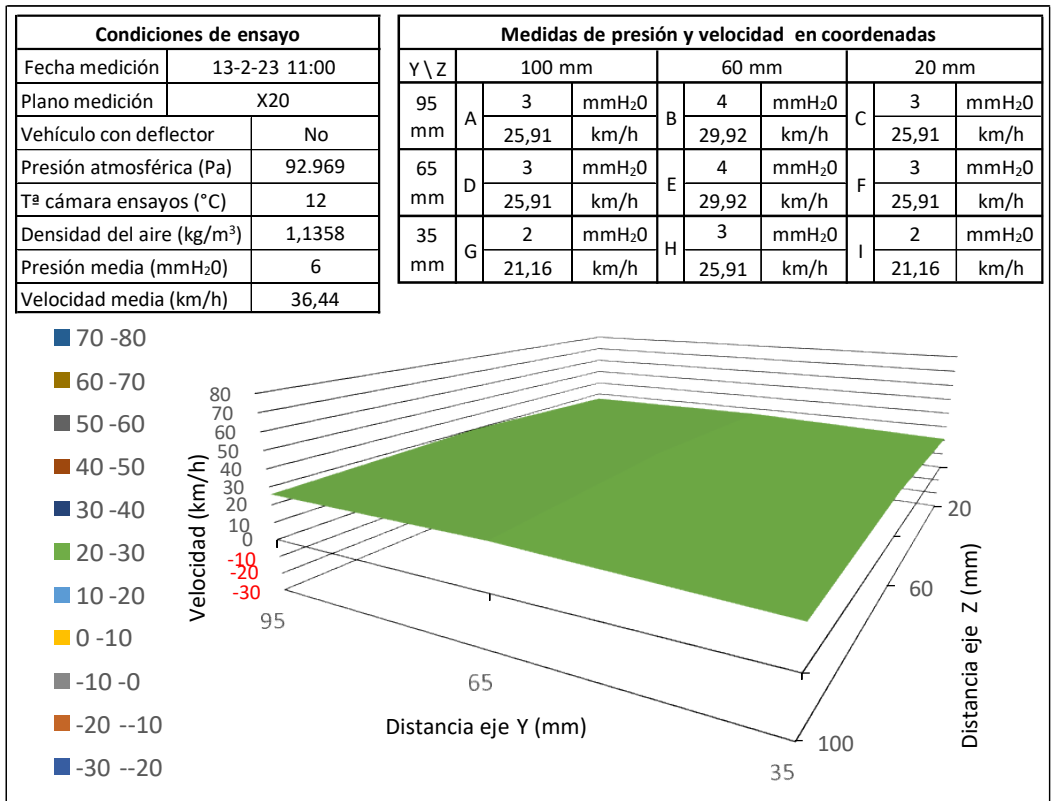


a)

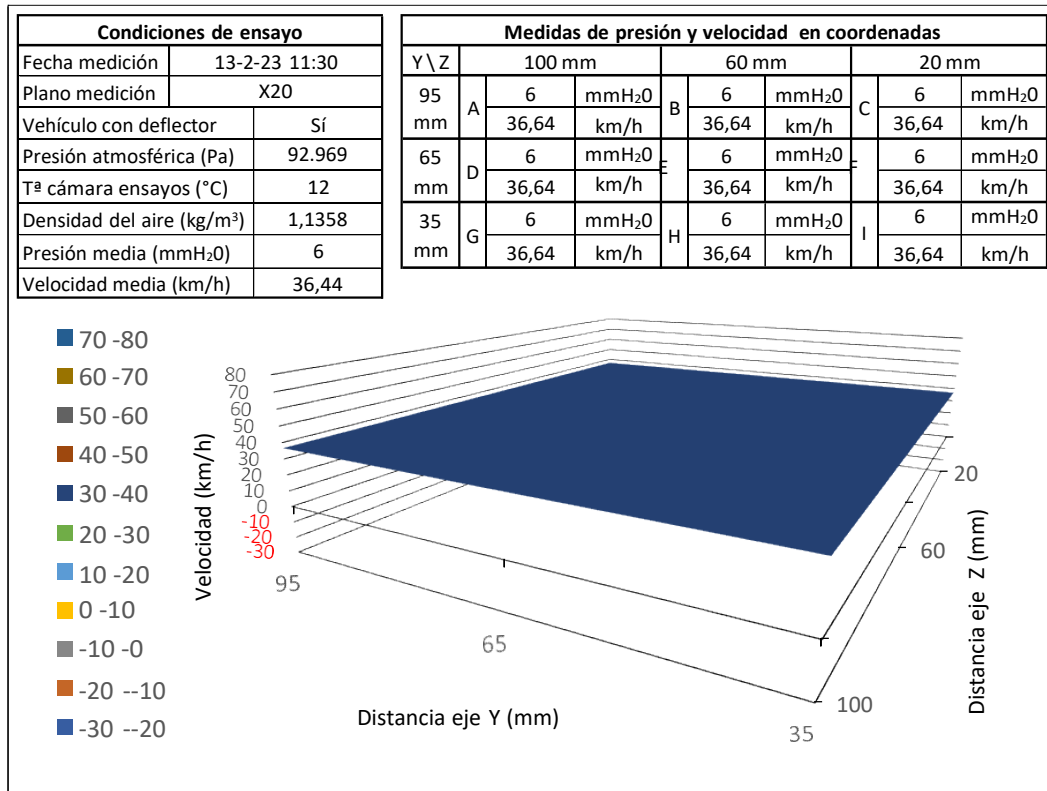


b)

Figura 3.5. Resultados en plano X10: a) sin deflector, b) con deflector.

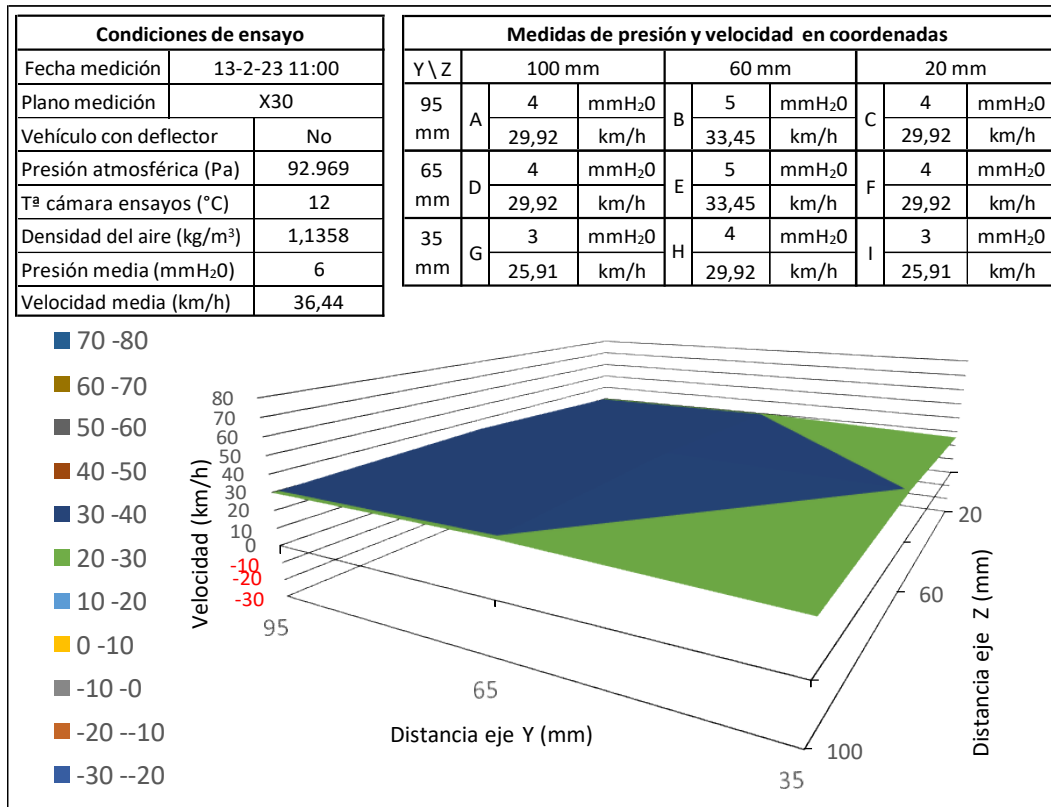


a)

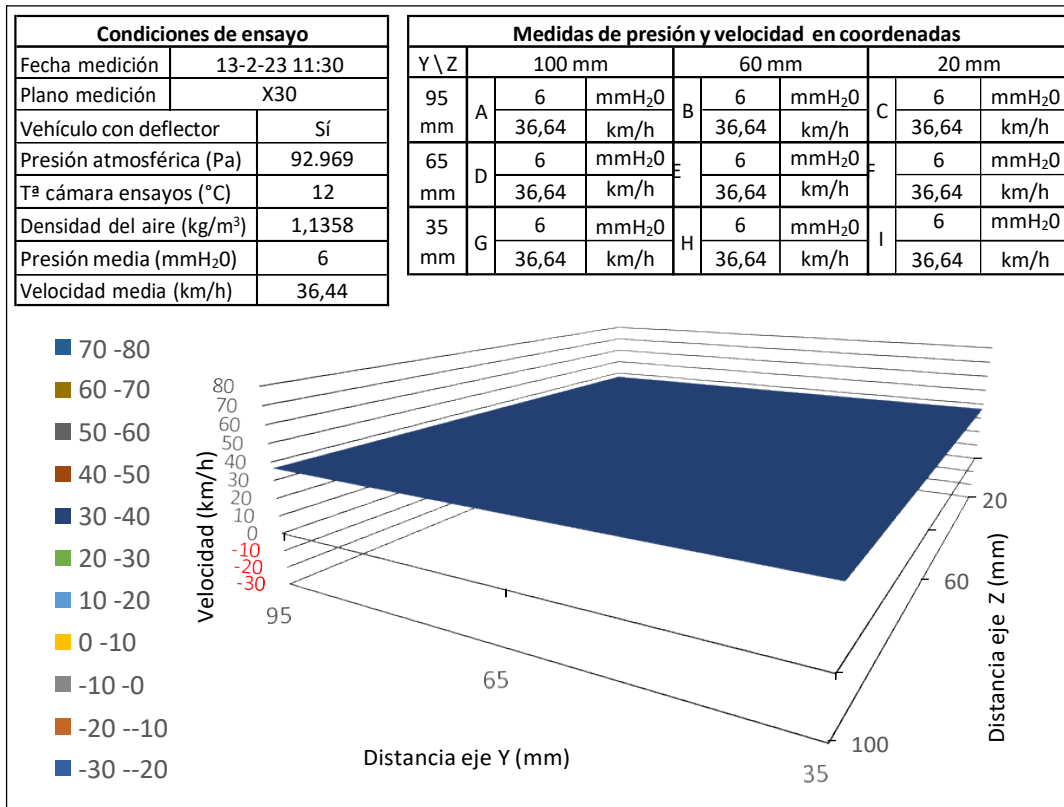


b)

Figura 3.6. Resultados en plano X20: a) sin deflector, b) con deflector.

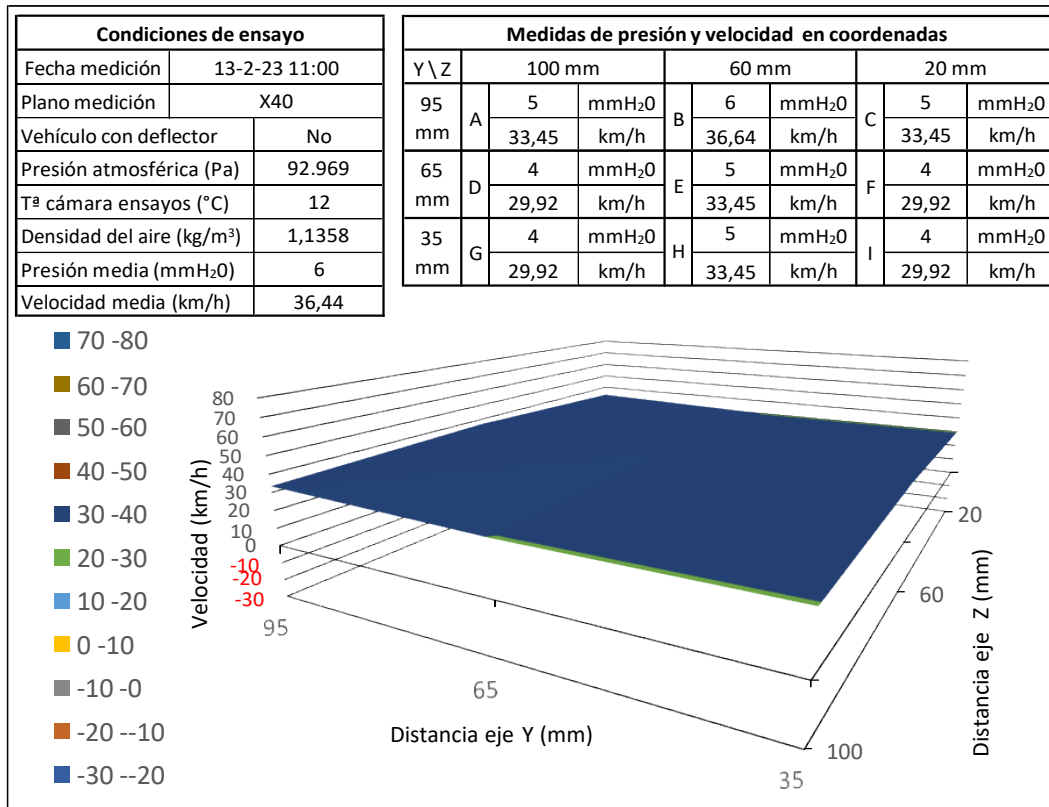


a)

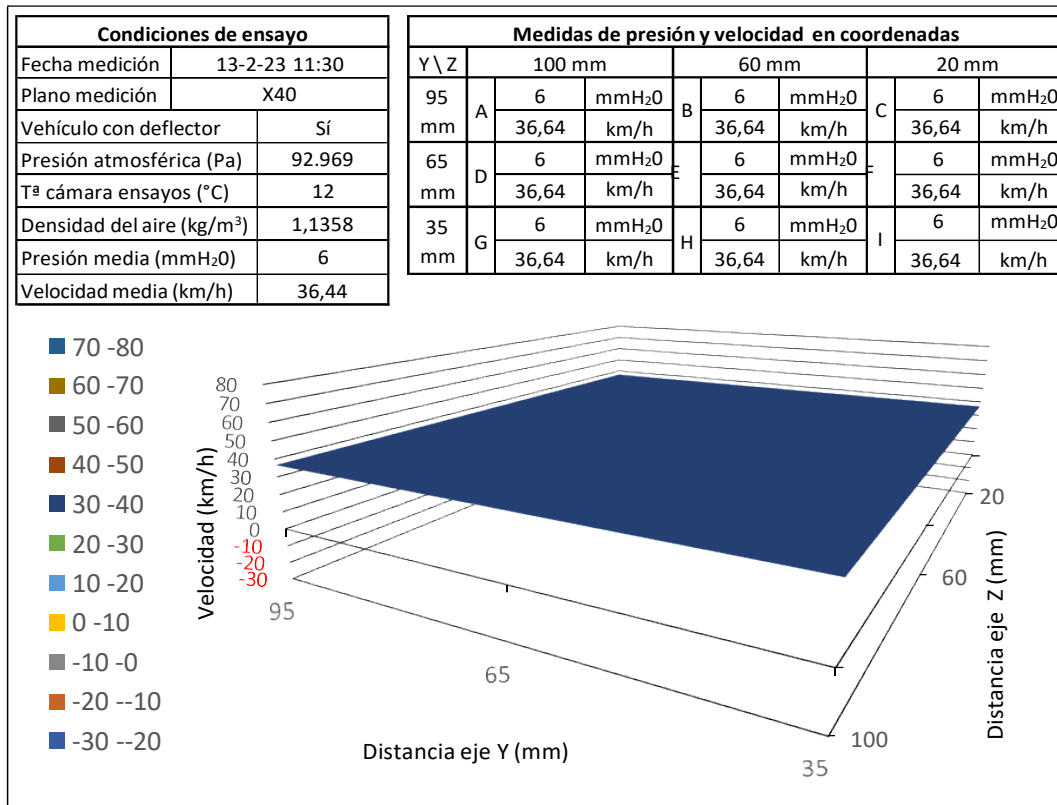


b)

Figura 3.7. Resultados en plano X30: a) sin deflector, b) con deflector.



a)

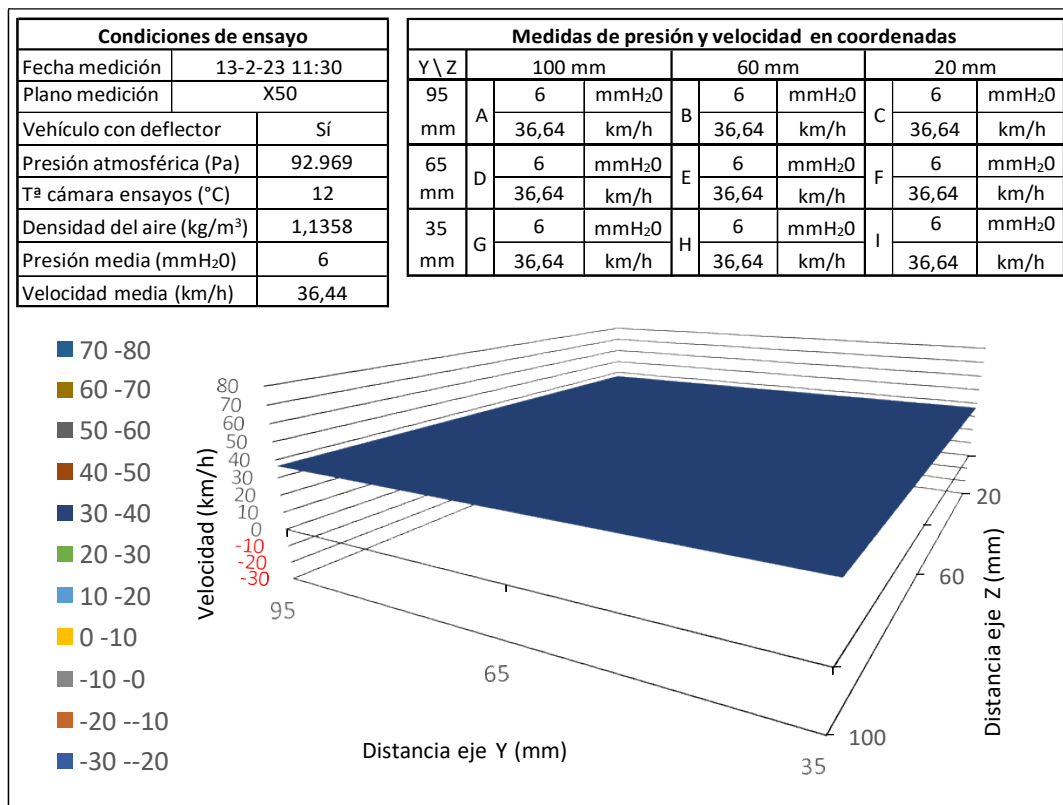


b)

Figura 3.8. Resultados en plano X40: a) sin deflector, b) con deflector.



a)



b)

Figura 3.9. Resultados en plano X50: a) sin deflector, b) con deflector.



3.2.2. A velocidade de 42 km/h

Partindo do plano X1 para o vehículo sin deflector ([Figura 3.10a](#)), os valores de presión son negativos, neste caso, non existe unha presión inferior na parte central, sino que se despraza cara a parte inferior do vehículo, incrementándose a medida que se aumenta a coordenada do eixe Y.

Este feito representa o vacío que se produce na parte posterior dos vehículos convencionais sin deflector, o cal implica efecto de succión.

Para o vehículo con deflector, as presións encontradas no plano máis próximo á maqueta, X1 ([Figura 3.10b](#)), son máis elevadas que no vehículo sin deflector, con un incremento de igual forma na parte superior do vehículo no eixe Y, que representa a aportación procedente de aire desde o deflector.

Para o plano X5, no vehículo sin deflector ([Figura 3.11a](#)) as presións van incrementándose lixeiramente pasando a ter signo positivo, mentres que no vehículo con deflector neste mesmo plano X5 ([Figura 3.11b](#)) os puntos ubicados na parte superior llegan a igualar a presión coa equivalente á proporcionada polo túnel de vento.

El plano X10 ([Figura 3.12](#)) é de transición, con incrementos de presión para ambas condicións, tanto sin deflector como considerando a súa incorporación, non obstante, hai que ter en conta que no vehículo con deflector as magnitudes das presións son superiores.

En o plano X20 a presión no vehículo con deflector ([Figura 3.13b](#)) está igualada coa do entorno (8 mmH₂O) en 7 dos 9 puntos considerados (exceptuando G e I). Sin embargo, no vehículo sin deflector ([Figura 3.13a](#)) aínda non chega a igualarse de forma parcial hasta o último plano medido X50 ([Figura 3.16a](#)), onde os puntos A, B e C correspondentes á coordenada Y95 se igualan á presión dos 8 mmH₂O do medio atmosférico equivalentes á velocidade de 42 km/h, mentres que os puntos inferiores no eixe Y continúan con presións máis baixas ao prolongarse a estela de baixas presións.



a)

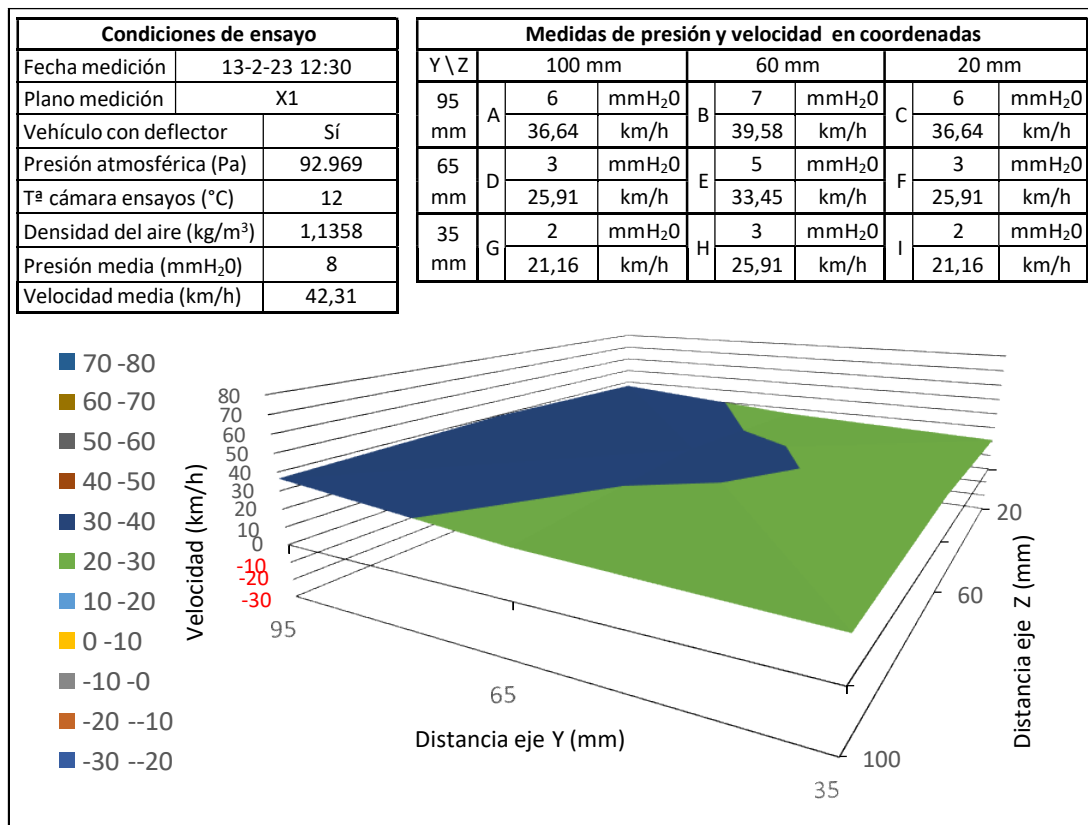
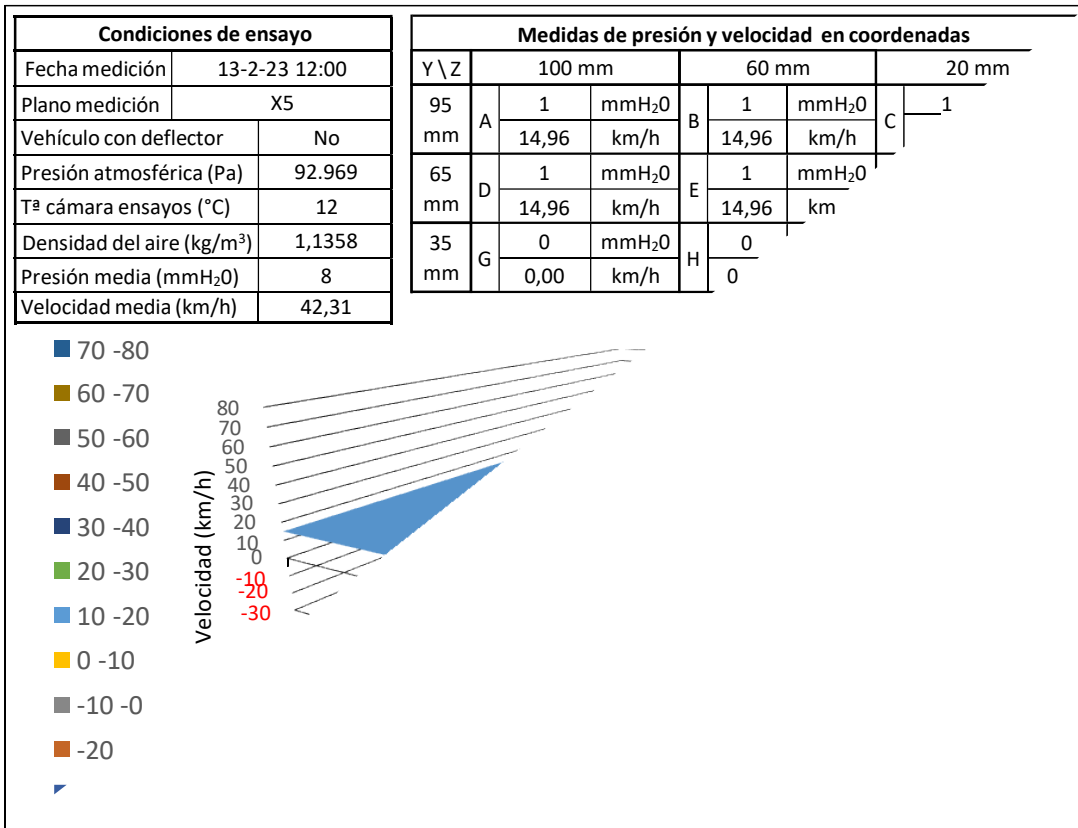
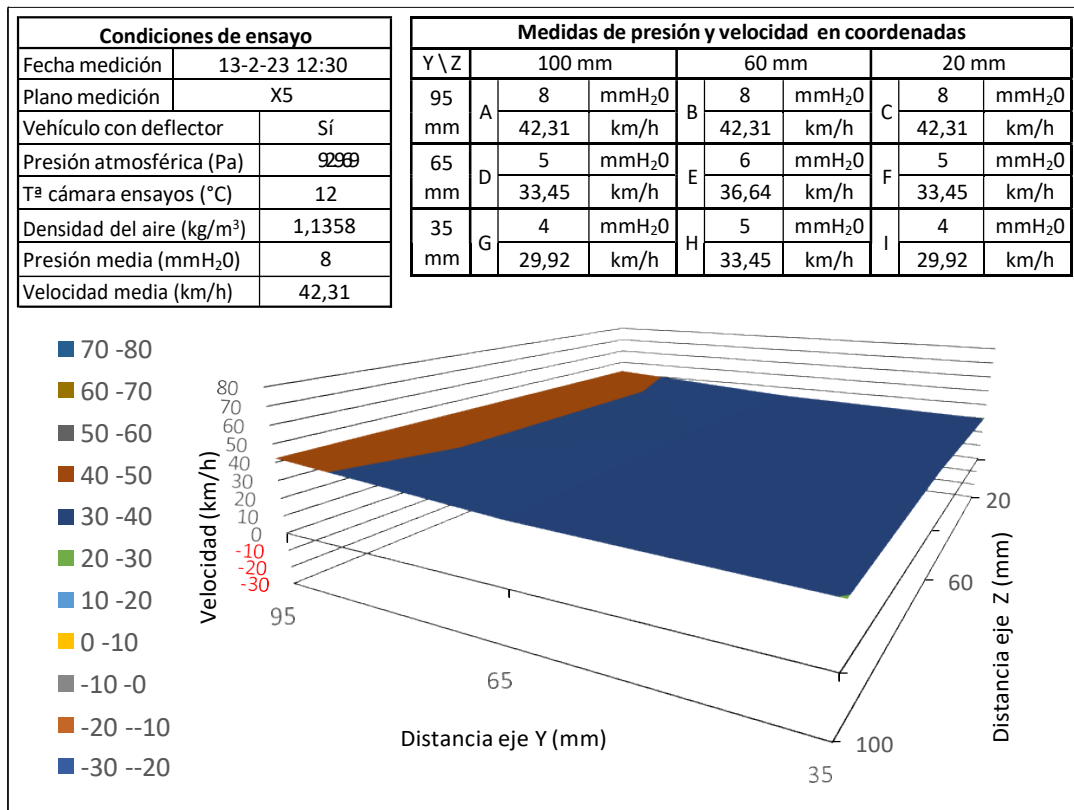


Figura 3.10. Resultados en plano X1: a) sin deflector, b) con deflector.

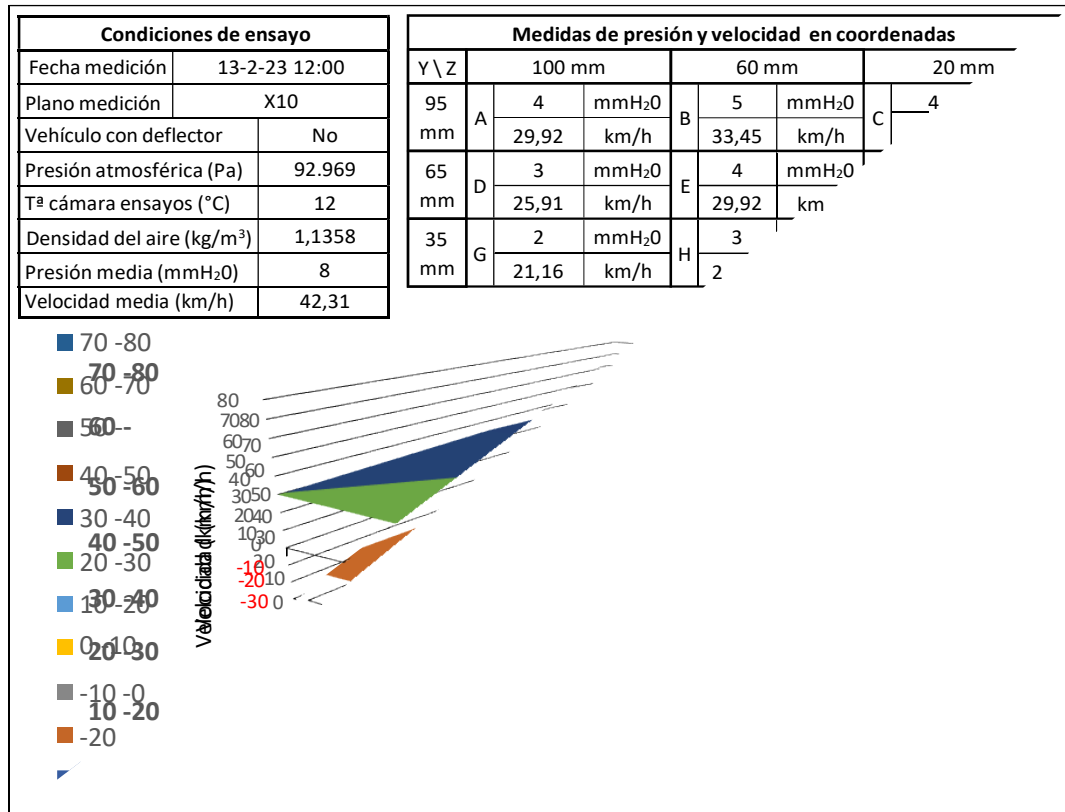


a)

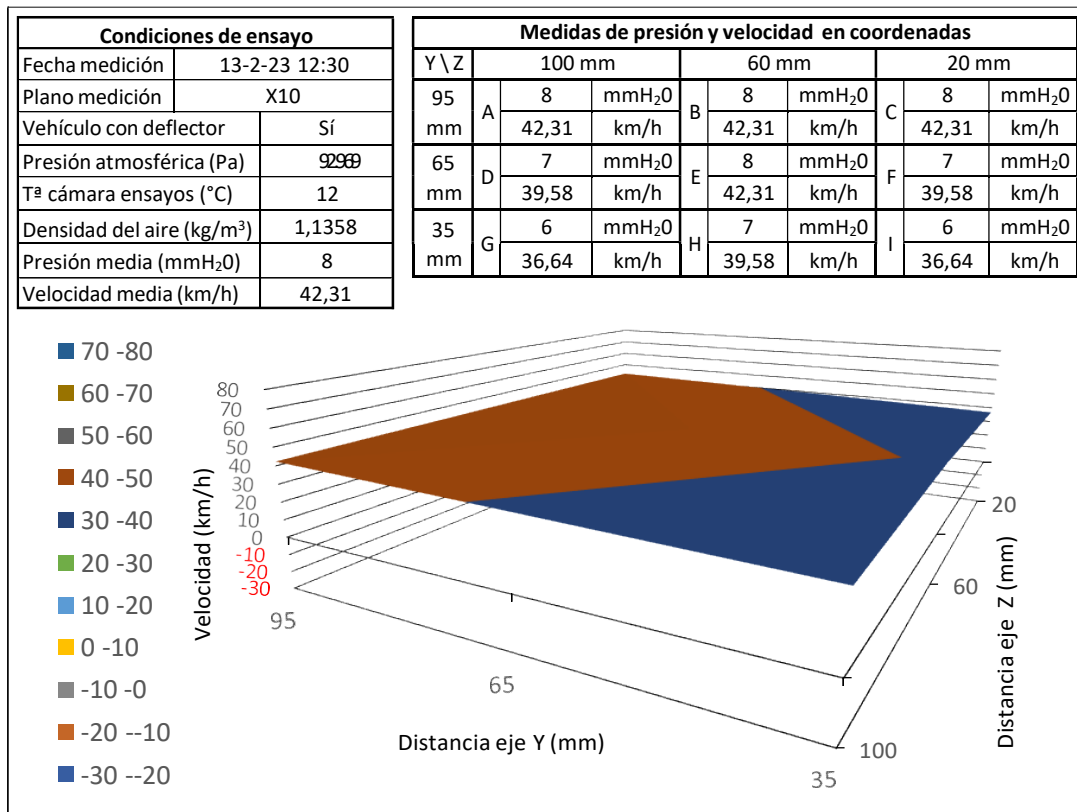


b)

Figura 3.11. Resultados en plano X5: a) sin deflector, b) con deflector.



a)



b)

Figura 3.12. Resultados en plano X10: a) sin deflector, b) con deflector.

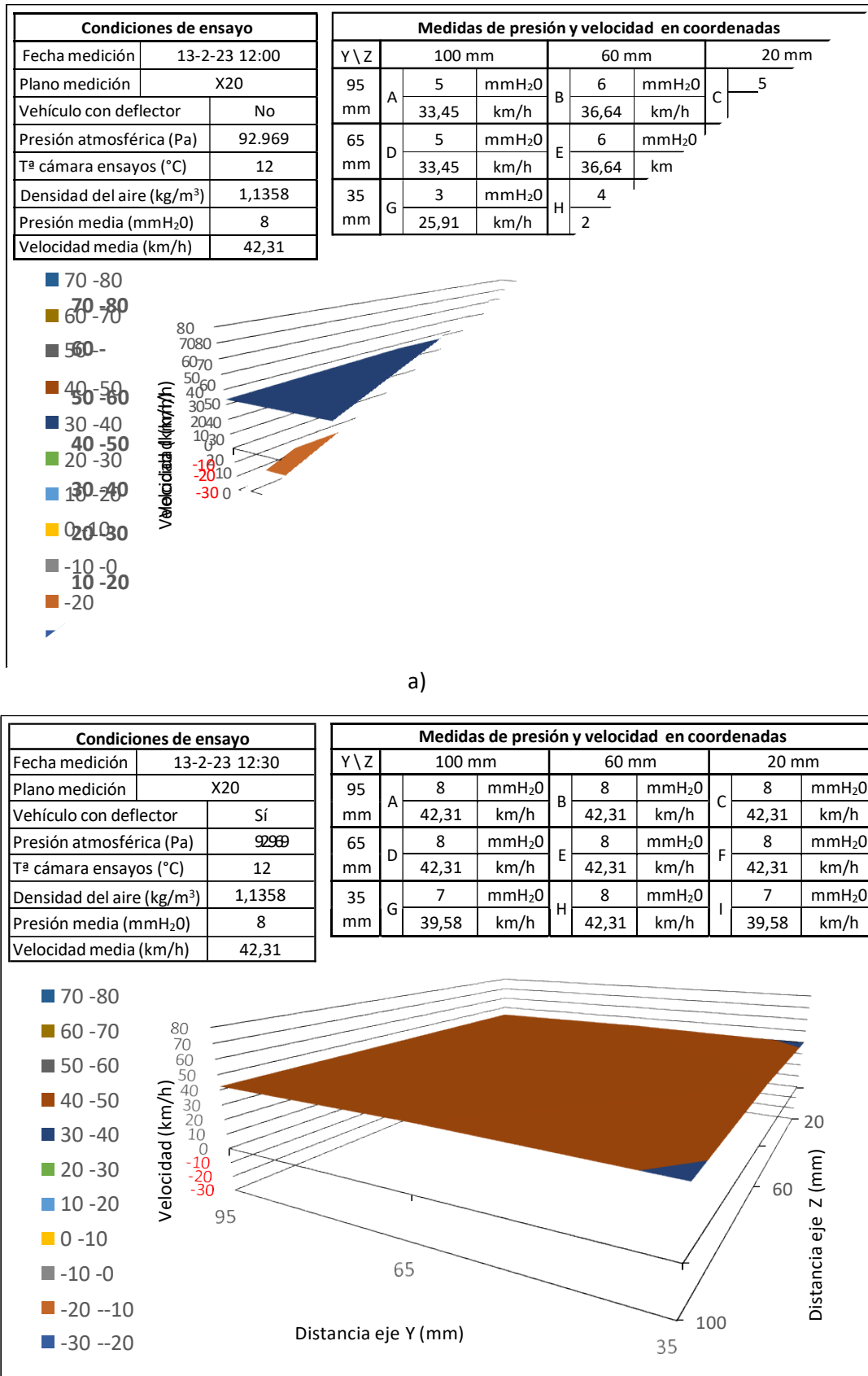


Figura 3.13. Resultados en plano X20: a) sin deflector, b) con deflector.

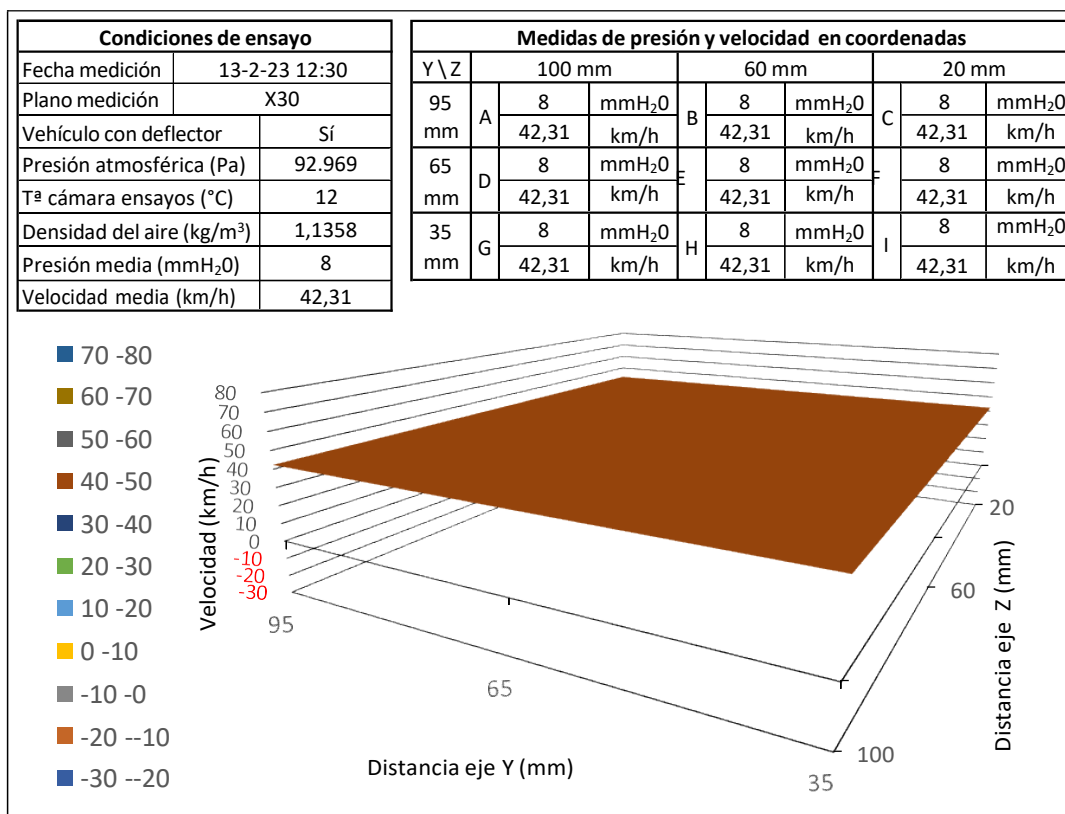
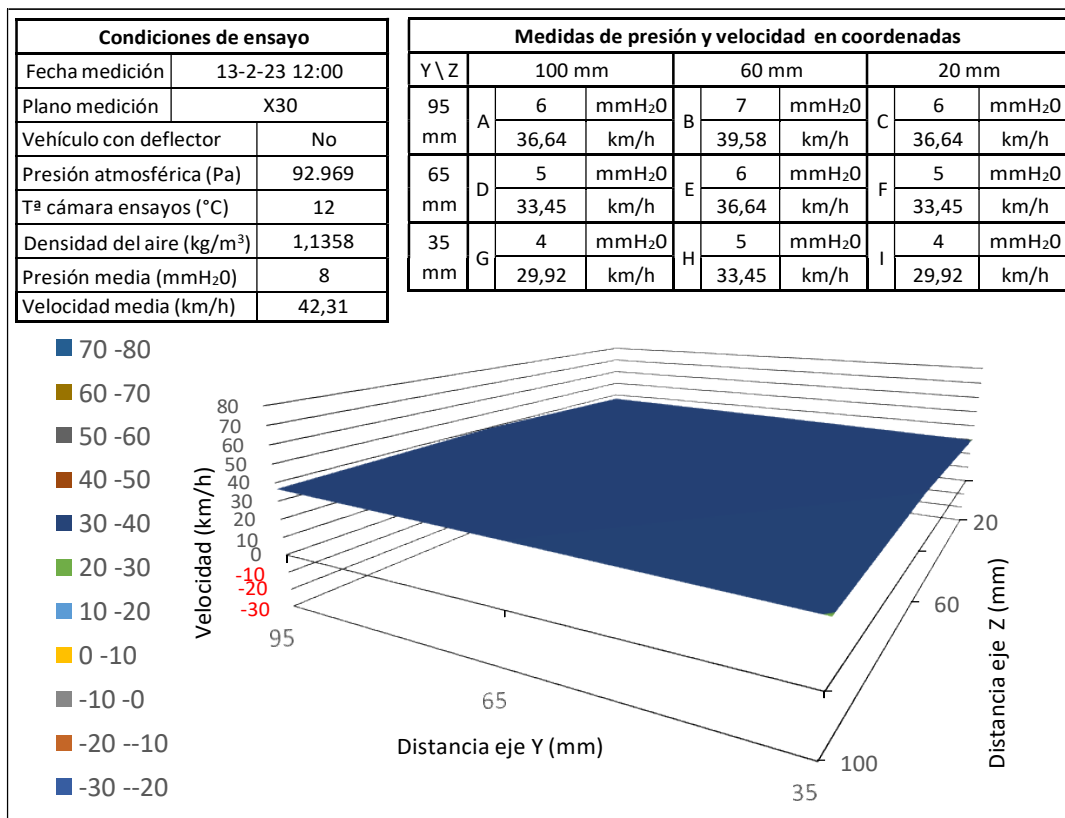
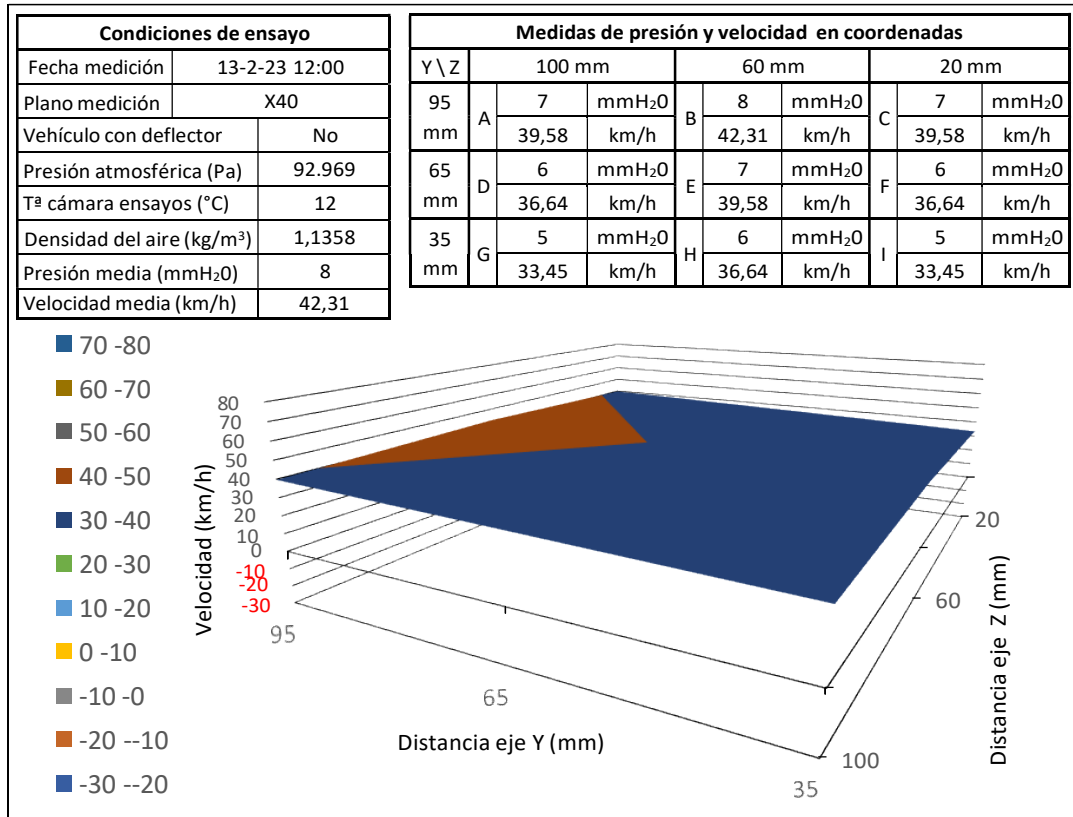
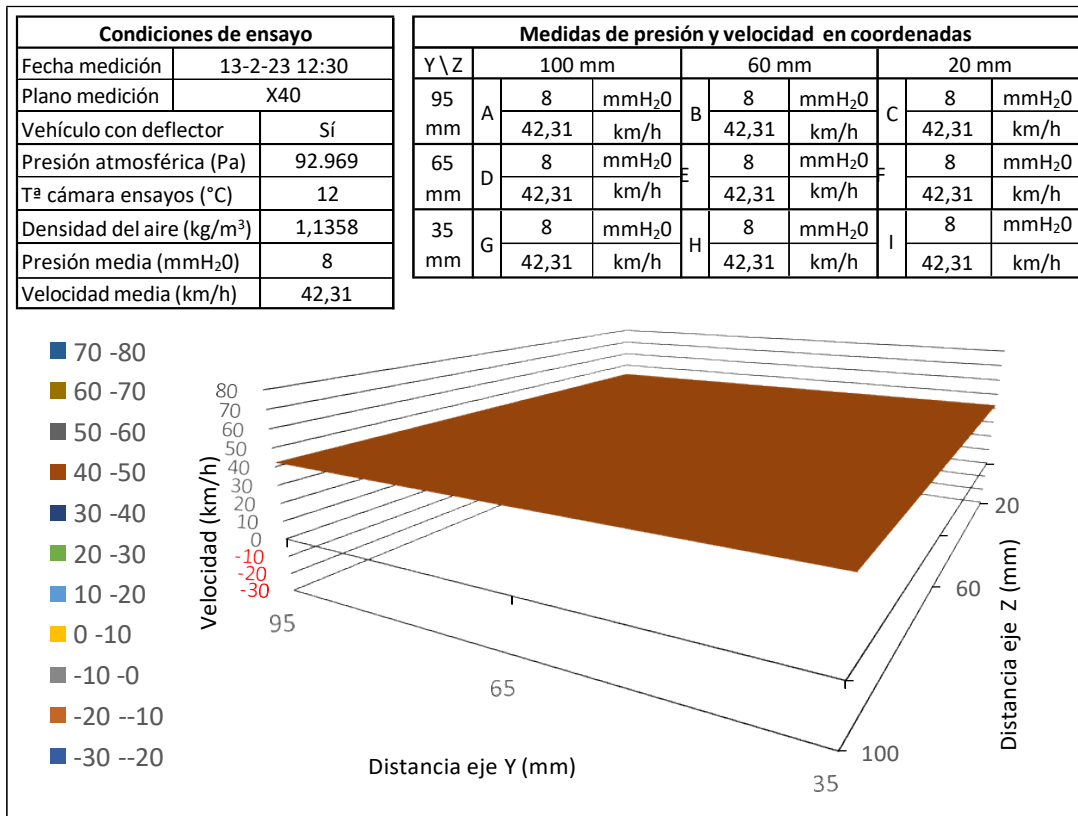


Figura 3.14. Resultados en plano X30: a) sin deflector, b) con deflector.

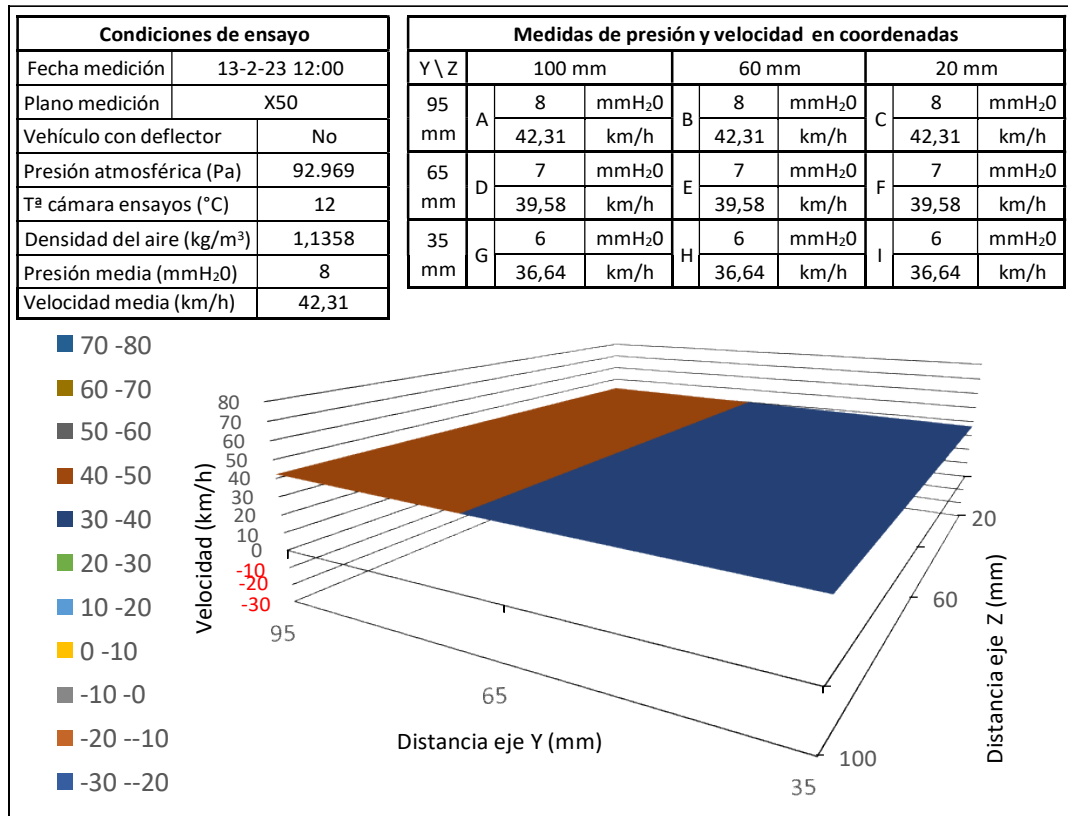


a)

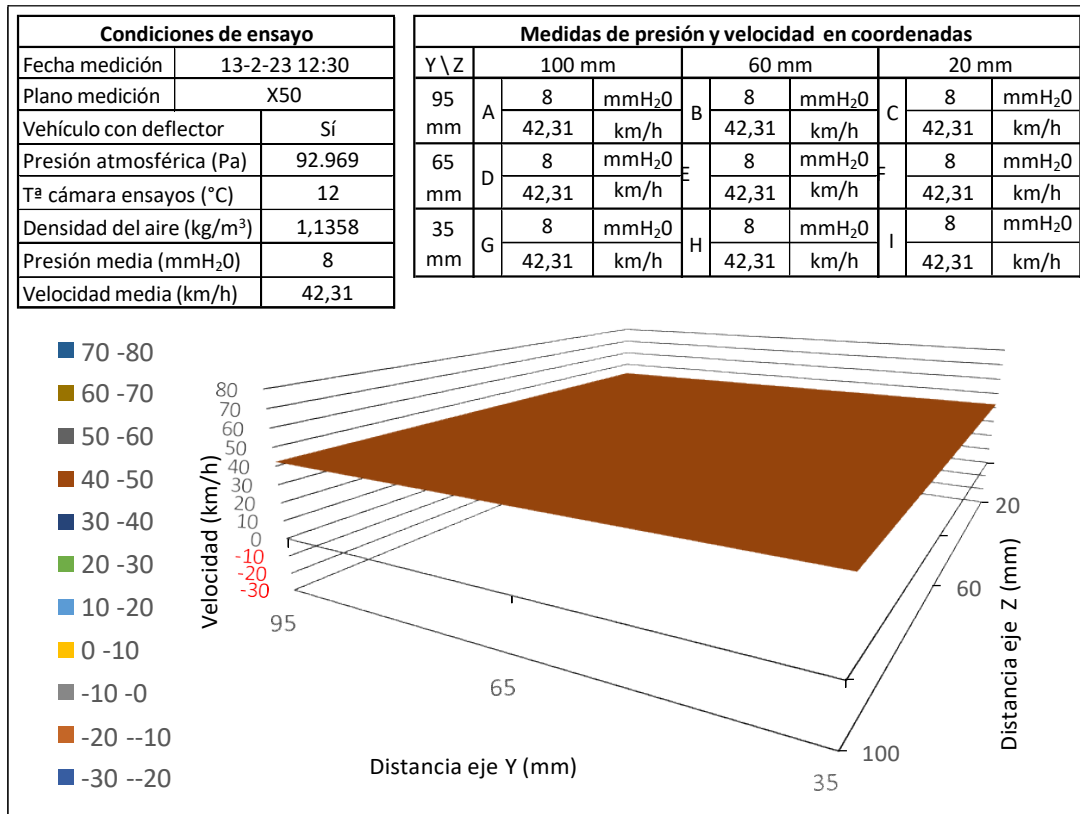


b)

Figura 3.15. Resultados en plano X40: a) sin deflector, b) con deflector.



a)



b)

Figura 3.16. Resultados en plano X50: a) sin deflector, b) con deflector.



3.2.3. Velocidad de 52 km/h

Para el vehículo sin deflector en el plano X1 ([Figura 3.17a](#)) se comienza con presiones con valor negativo que se incrementan en la parte central del plano, zona donde existe un mayor vacío y dificultad del aire por llegar a rellenar esa zona. Mientras que para el vehículo con deflector ([Figura 3.17b](#)) se parte de valores de presión positivos elevados en la parte superior del plano (puntos A, B y C) del orden de 8-9 mmH₂O, los cuales disminuyen en los puntos de la parte inferior del plano pero sin llegar a ser negativos, alcanzando valores mínimos de 2 mmH₂O.

En los siguientes planos consecutivos del eje X ([Figura 2.37](#)) para el vehículo sin deflector (X5 en [Figura 3.18a](#), X10 en [Figura 3.19a](#), X20 en [Figura 3.20a](#), X30 en [Figura 3.21a](#), X40 en [Figura 3.22a](#) y X50 en [Figura 3.23a](#)), se aprecia un ligero incremento de las presiones desde la parte superior a la parte inferior del eje Y con un leve incremento en los puntos centrales B y E en comparación con los puntos A, C, D y F respectivamente.

En el plano X10 para el vehículo con el sistema de canalización incorporado ([Figura 3.19b](#)), los valores de presión se igualan a los del medio atmosférico en la parte superior, es decir, en los 3 puntos asociados a la coordenada Y95 (A, B y C) según la [Figura 2.36](#).

Asimismo, en el plano X20 con deflector ([Figura 3.20b](#)) ya no existe apenas presencia de las bajas presiones generadas por el vehículo, mientras que para el vehículo sin deflector ([Figura 3.20b](#)) las presiones se van incrementando con valores superiores en los puntos de la coordenada Y95 (A, B y C) respecto de los de la coordenada Y65 (D, E y F) y de Y65 sobre Y35 (G, H, I), pero en ningún caso llegando a alcanzar la presión de ensayo de magnitud 12 mmH₂O, reflejando la repercusión negativa del vacío generado en los vehículos.

En los planos sucesivos del vehículo sin la incorporación de la mejora aerodinámica sobre la maqueta, se continúa apreciando el incremento paulatino de presión, no llegando a alcanzar los valores de la presión del ensayo hasta el último plano X50 ([Figura 3.23a](#)) en el punto B, estando el resto de puntos en valores inferiores.

Siguiendo la misma línea de análisis, considerando el vehículo con el sistema deflector, se observa que a partir del plano X30 todos los puntos ya se encuentran unificados a la presión del medio de valor 12 mmH₂O equivalentes a la velocidad de 52 km/h, es decir, todos los puntos del plano X30 ([Figura 3.21b](#)), plano X40 ([Figura 3.22b](#)) y X50 ([Figura 3.23b](#)). De este modo, este hecho refleja nuevamente la ventaja que representa de forma generalizada los valores más elevados de presión en el vehículo con el sistema de canalización aerodinámico, debido a que contribuyen a disminuir la resistencia de arrastre que influye negativamente en el sentido de avance de circulación de los automóviles.

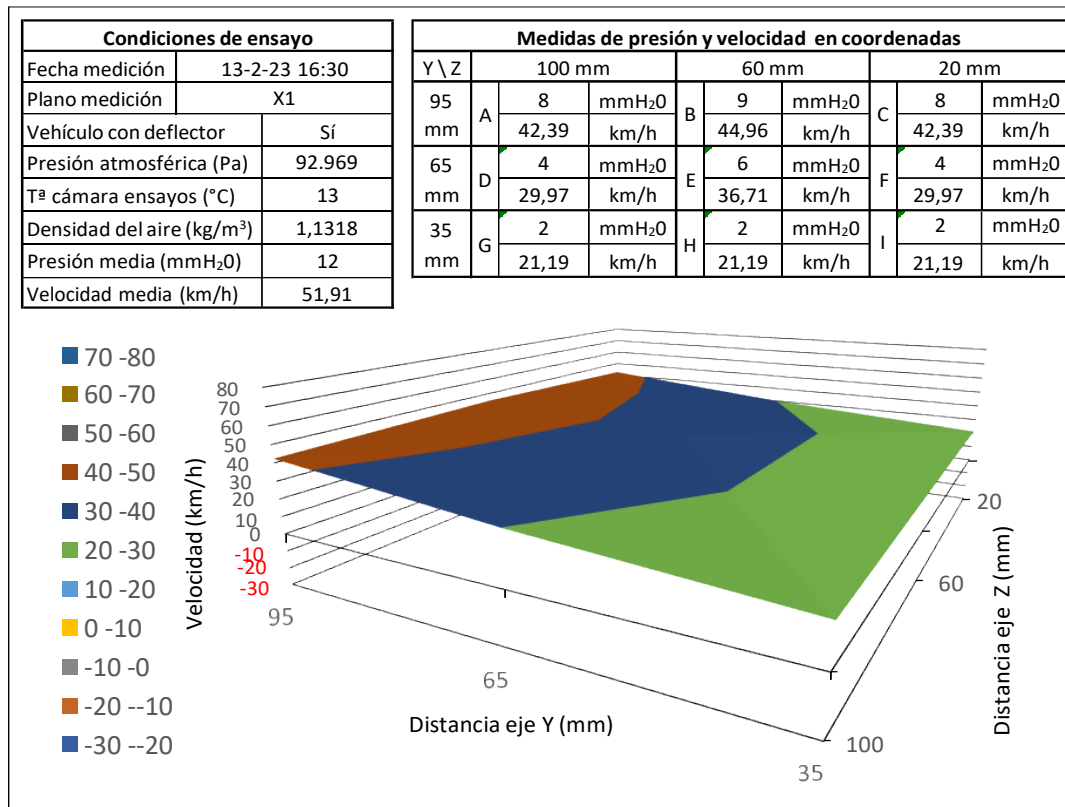
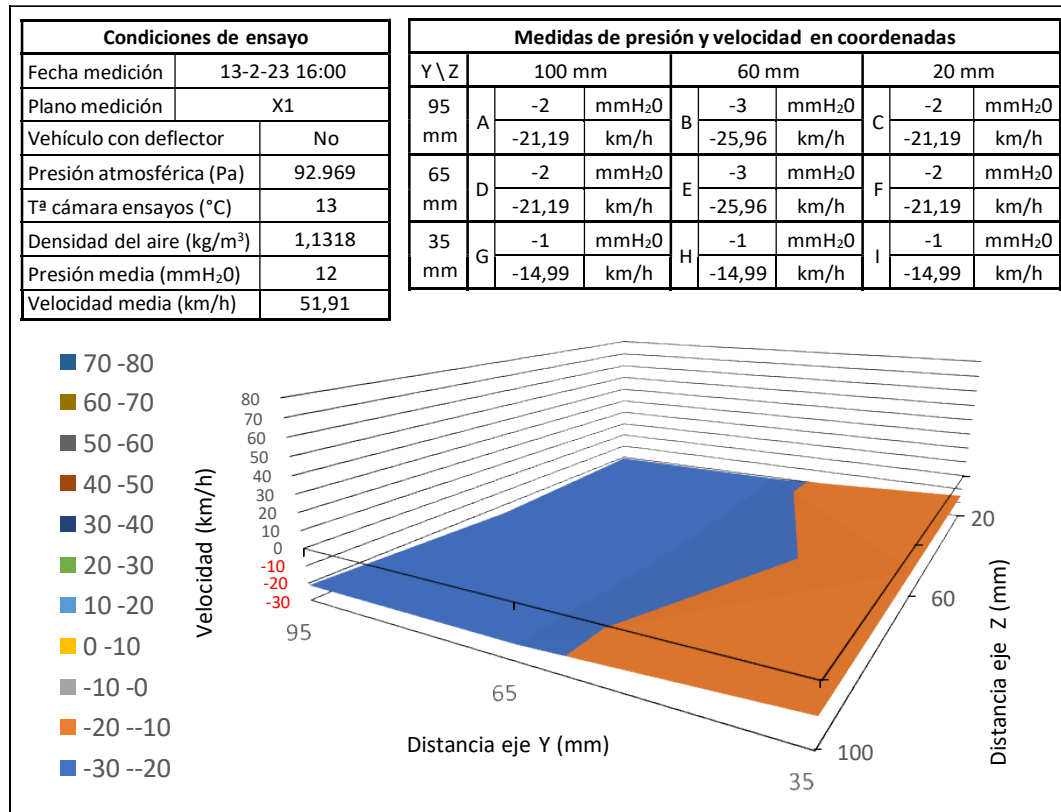
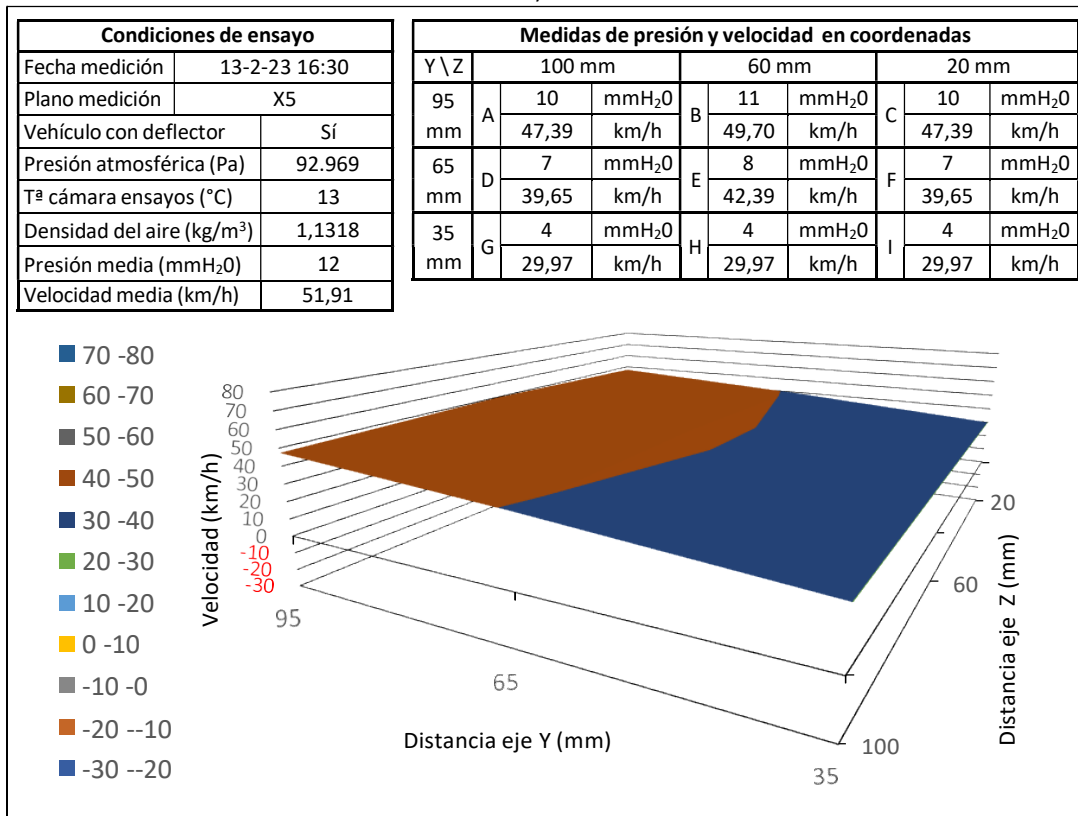


Figura 3.17. Resultados en plano X1: a) sin deflector, b) con deflector.



a)



b)

Figura 3.18. Resultados en plano X5: a) sin deflector, b) con deflector.

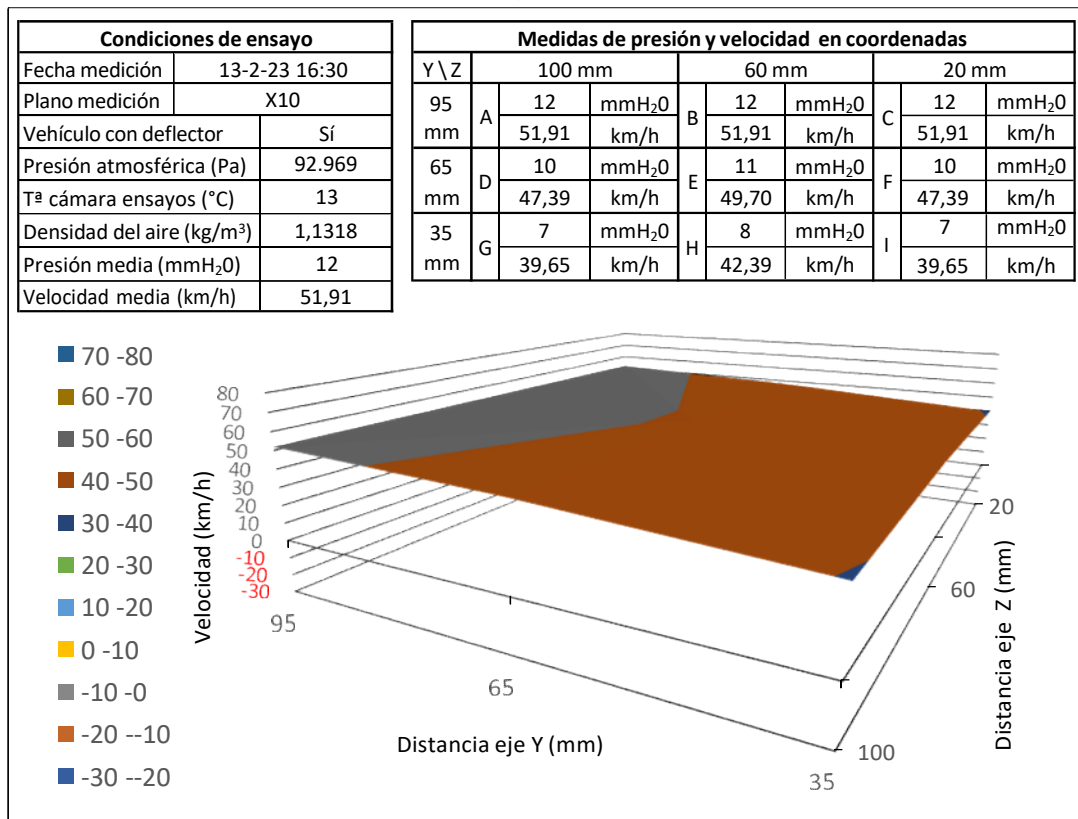
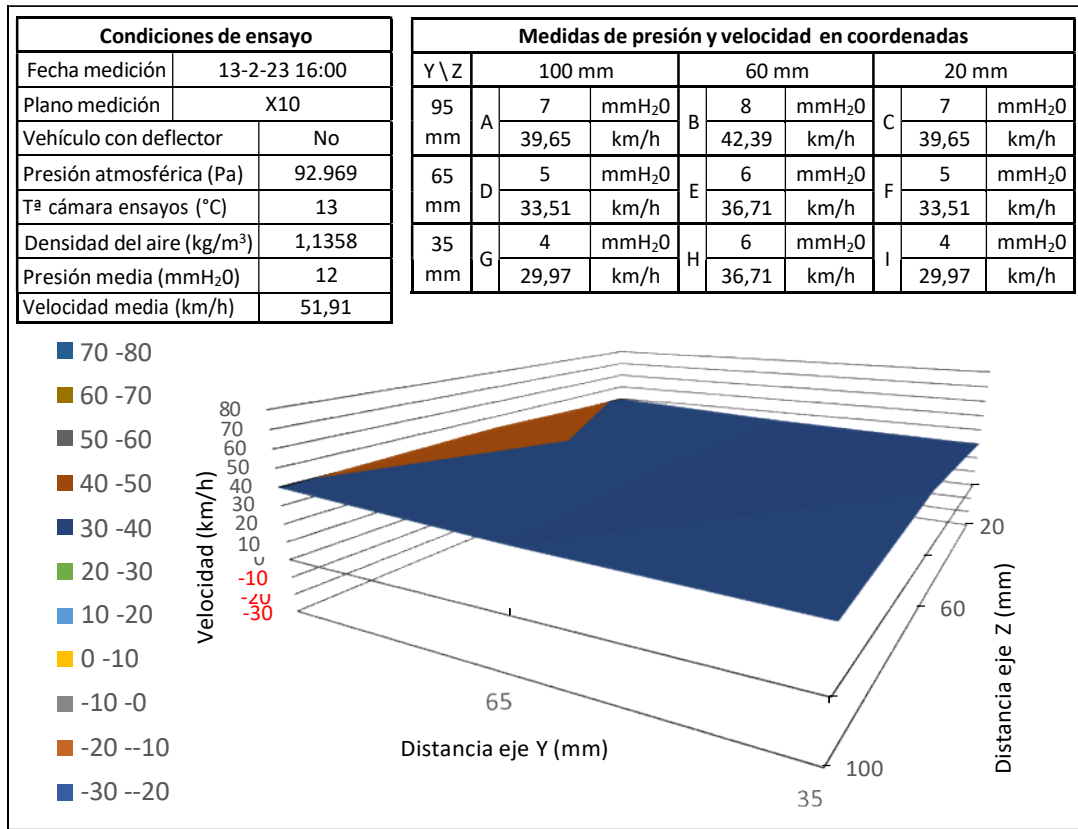
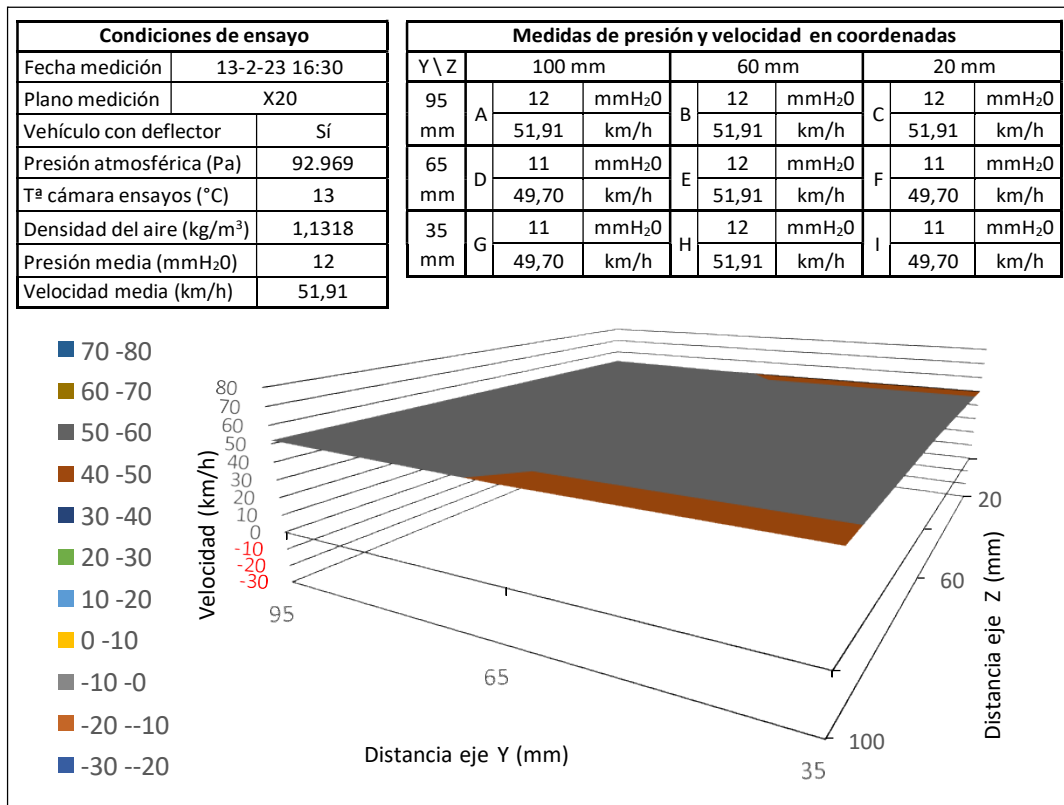


Figura 3.19. Resultados en plano X10: a) sin deflector, b) con deflector.



a)

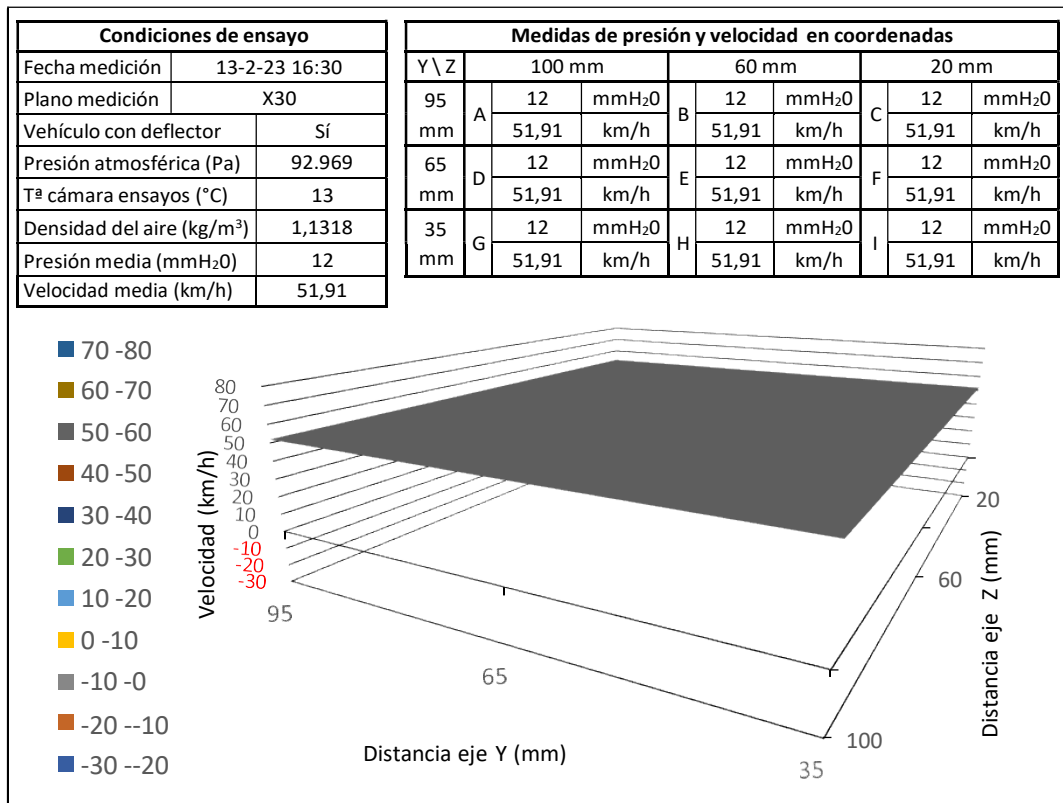


b)

Figura 3.20. Resultados en plano X20: a) sin deflector, b) con deflector.

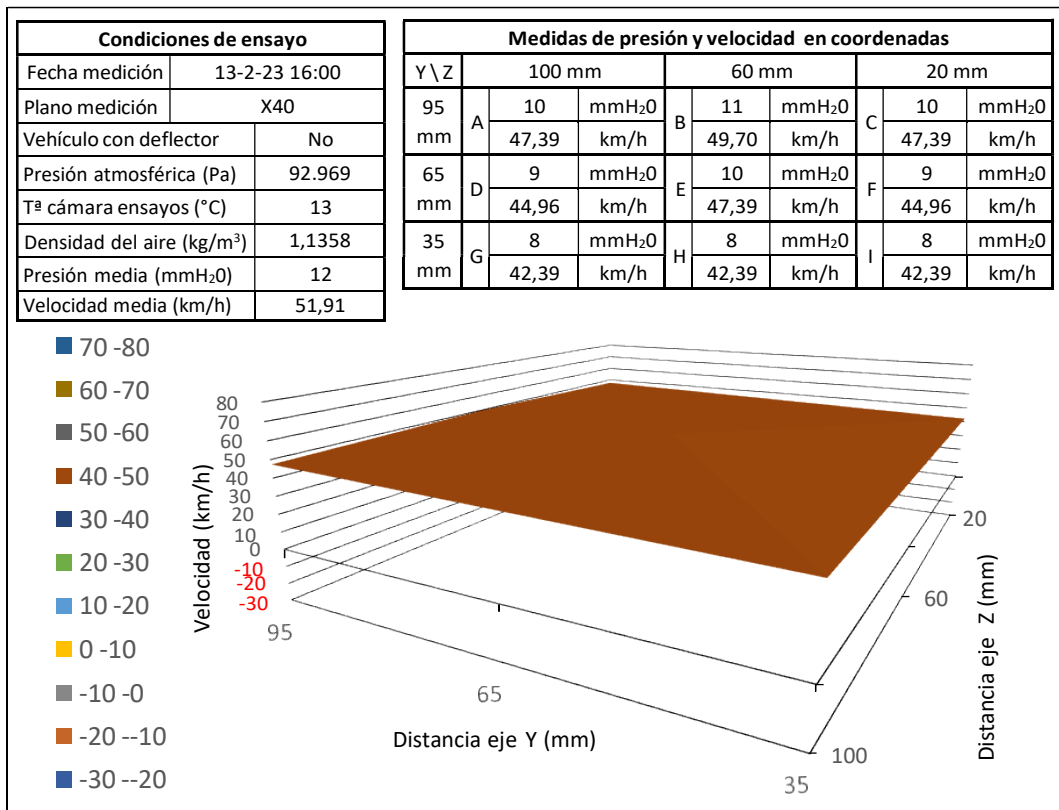


a)

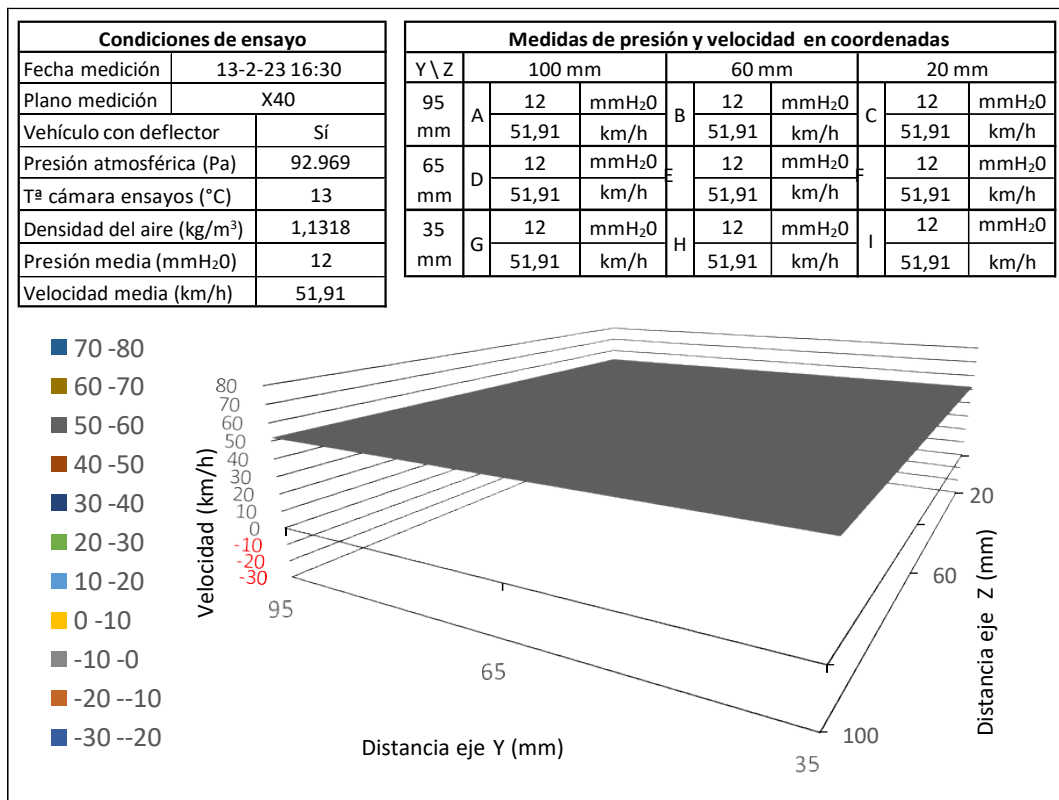


b)

Figura 3.21. Resultados en plano X30: a) sin deflector, b) con deflector.



a)

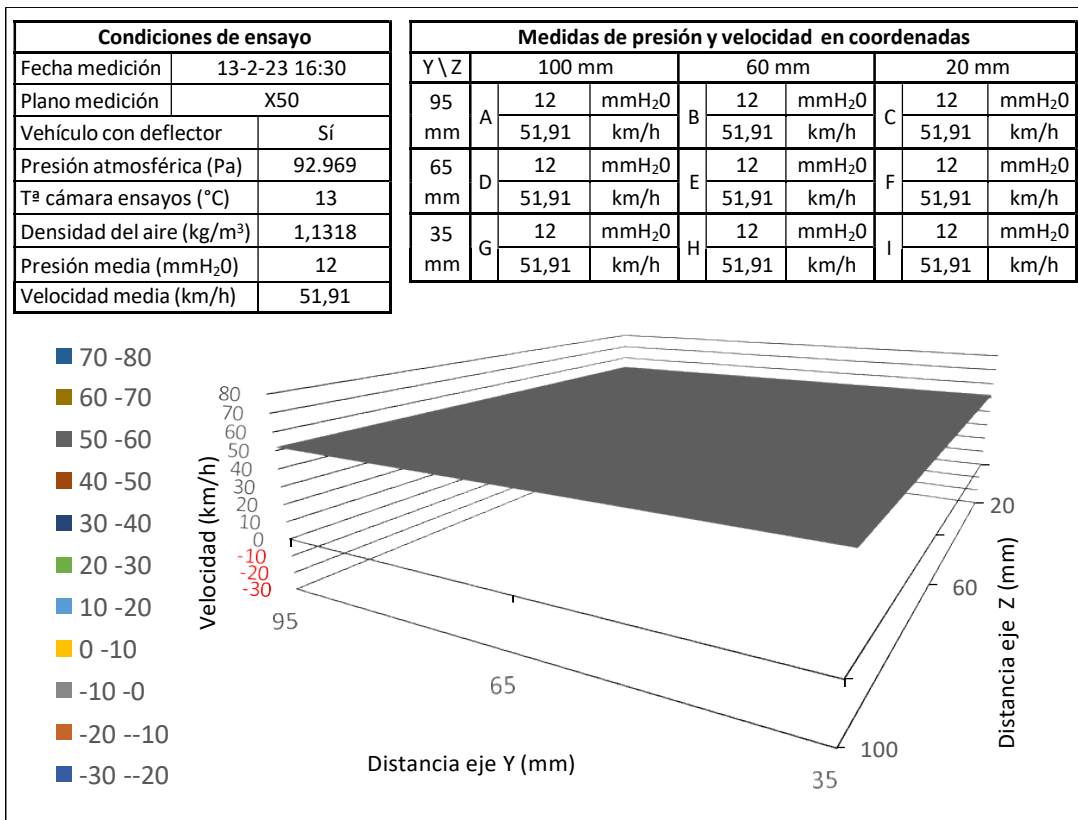


b)

Figura 3.22. Resultados en plano X40: a) sin deflector, b) con deflector.



a)



b)

Figura 3.23. Resultados en plano X50: a) sin deflector, b) con deflector.



3.2.4. Velocidad de 65 km/h

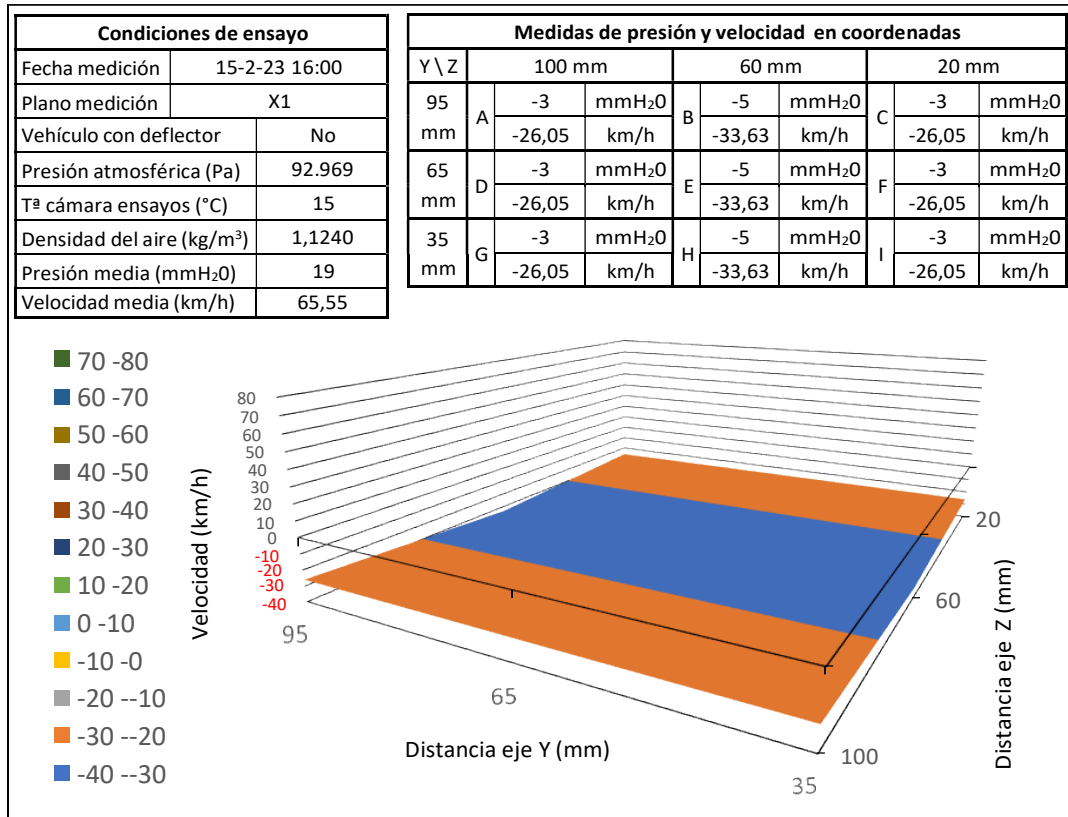
Al que los análisis anteriores de velocidades inferiores y comenzando por considerar el vehículo sin el sistema deflector, se encuentra en el primer plano X1 (Figura 3.24a), la existencia de valores de presión negativa. En esta nueva medición se detectan valores de presión menores, y más notoriamente en los puntos centrales del plano, B, E y H.

Seguidamente, se continúa la valoración del mismo plazo X1 pero en esta ocasión teniendo en cuenta el sistema de canalización aerodinámico (Figura 3.24b), donde se observa que los valores de presión son muy superiores a los del ensayo equivalente sin el sistema deflector, con una pendiente decreciente desde los puntos de la parte superior, es decir, los situados en la coordenada Y95 (A, B y C) hacia los puntos en coordenadas inferiores Y65 e Y35, con un gradiente en decremento, pero en este caso con una mayor pendiente que para velocidades inferiores, ya que se localizan en este mismo plano diferencias de 12 mmH₂O en presión, equivalente a 32 km/h.

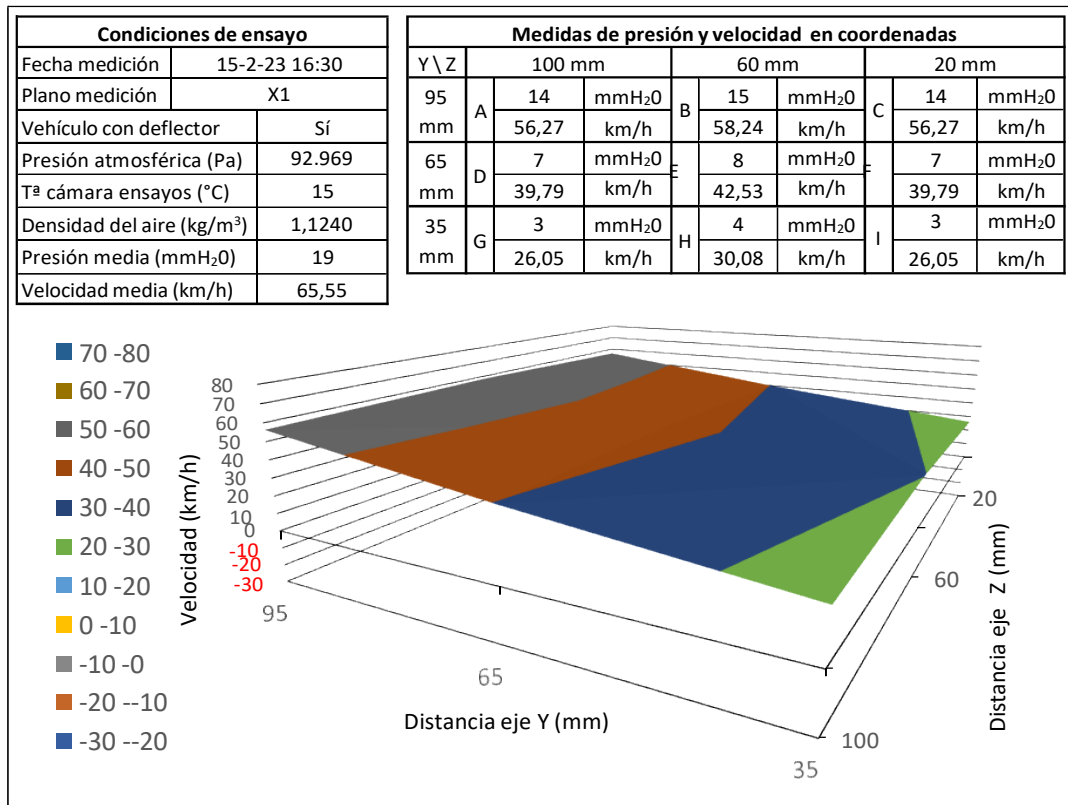
Por consiguiente, se refleja la gran aportación del deflector desde la parte superior, que se traslada al resto de planos consecutivos X5 (Figura 3.25b), X10 (Figura 3.26b) y X20 (Figura 3.27b), donde dicha pendiente evoluciona en disminución, llegando a alcanzar en el plano X20 la velocidad del flujo de aire del túnel de viento en el punto B y unificándose prácticamente con el entorno en los planos X40 (Figura 3.29b) y X50 (Figura 3.30b) de forma gradual.

Para el vehículo sin deflector con valores en los puntos A y C más elevados respecto del punto B e inferiores en los puntos D y F respecto del punto E, podría representar la existencia de vórtices, al no repetirse un patrón regular con puntos de presión en gradiente decreciente como en los planos ya tratados anteriormente.

En los planos sucesivos X10, X20, X30, X40 y X50 (Figuras 3.26-3.30) la presión se va incrementando de forma gradual, alcanzando por primera vez la presión media de 19 mmH₂O proporcionada por el túnel de viento en el plano X20, en concreto en el punto B, hecho que se mantiene de igual manera en el siguiente plano X30. No obstante, en el plano X40 también se adquiere la presión media de 19 mmH₂O en varios puntos contiguos al punto B, los cuales son A, C y E. Finalmente, en el plano X50 además se alcanza dicha presión en los puntos colindantes D, F y H, de tal modo que los puntos G e I se quedan muy próximos al obtenerse un valor de 18 mmH₂O. De esta evolución se concluye que el flujo de aire inicialmente concentra mayor presión en el punto B, que es el punto central de la coordenada Y95 y a medida que se mide a mayor distancia respecto del final del vehículo, se va ampliando progresivamente la sección del flujo de aire con mayor fuerza.

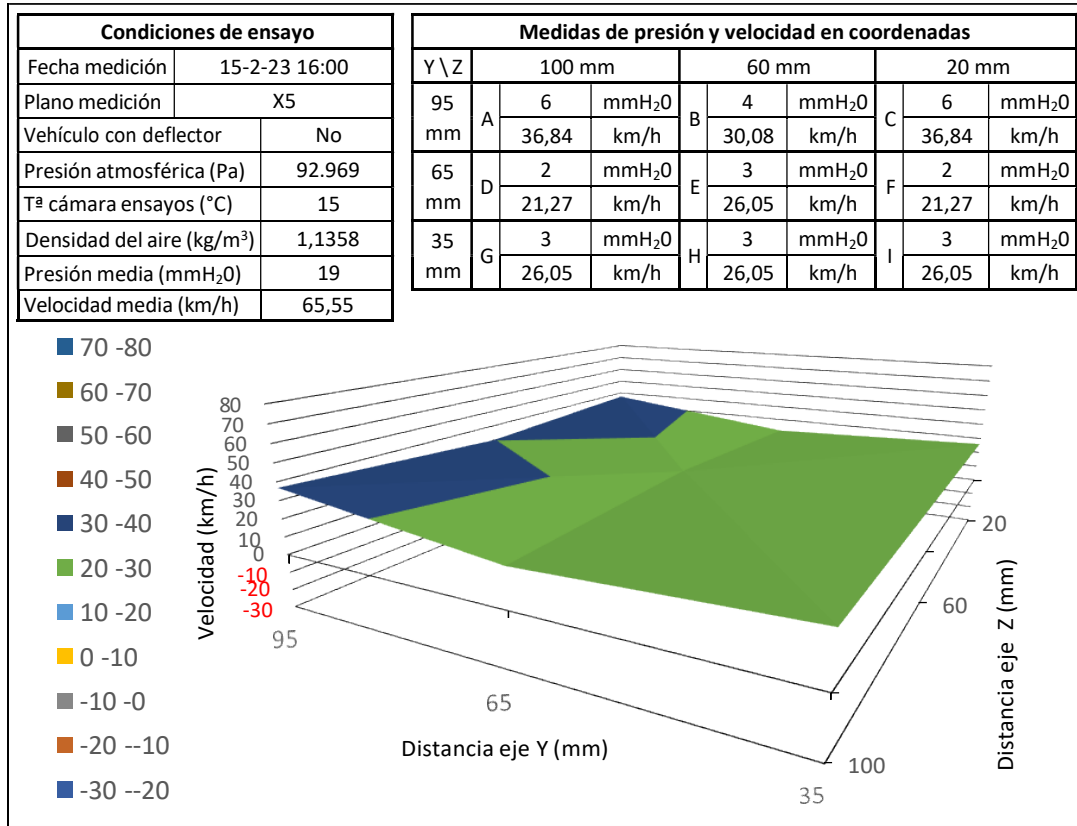


a)

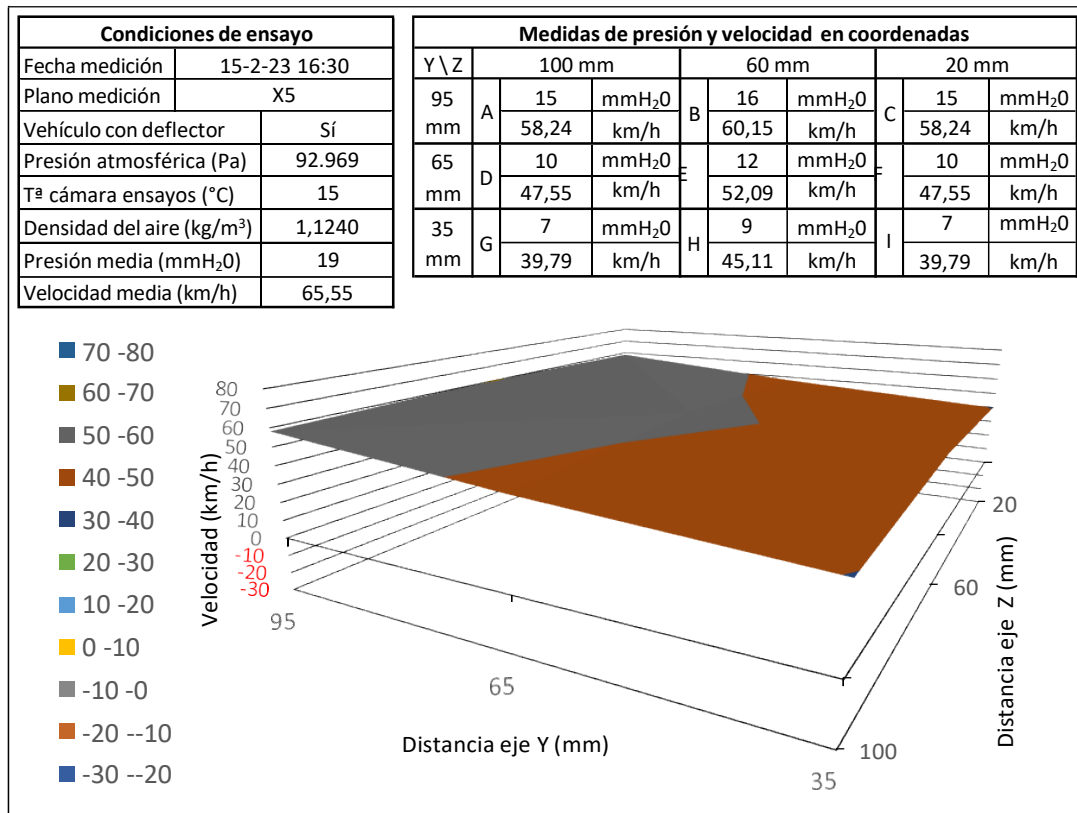


b)

Figura 3.24. Resultados en plano X1: a) sin deflector, b) con deflector.



a)



b)

Figura 3.25. Resultados en plano X5: a) sin deflector, b) con deflector.

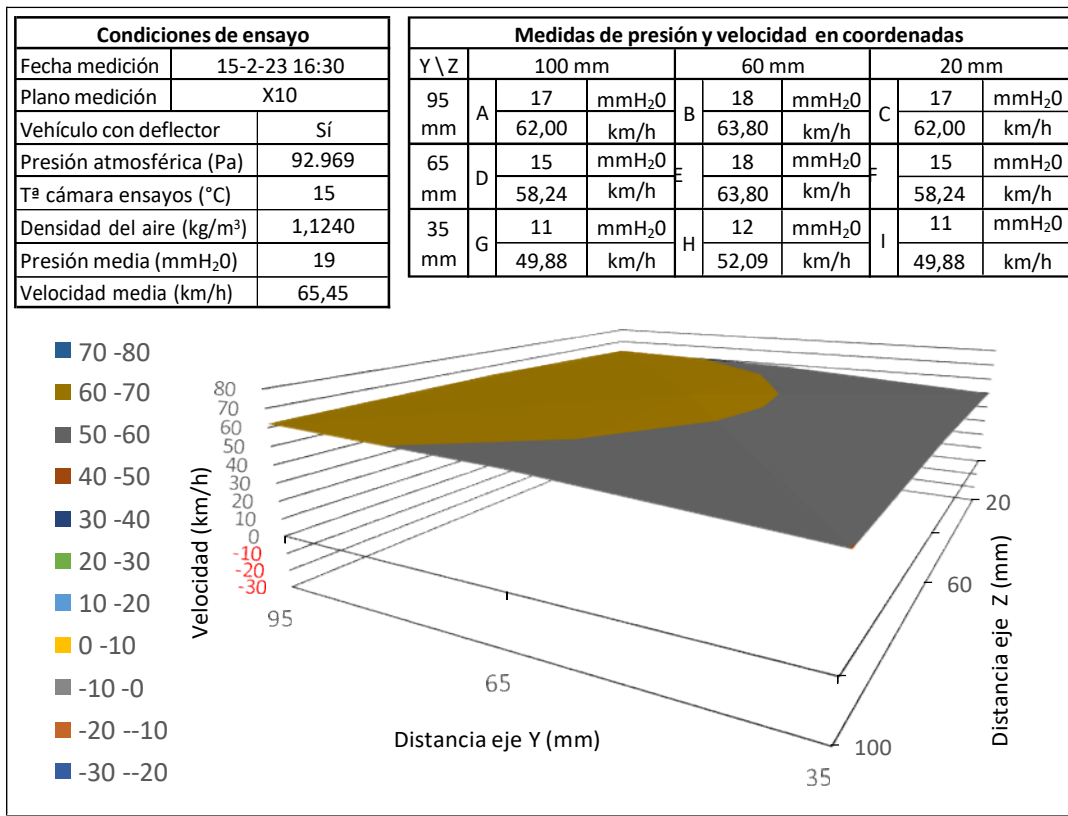
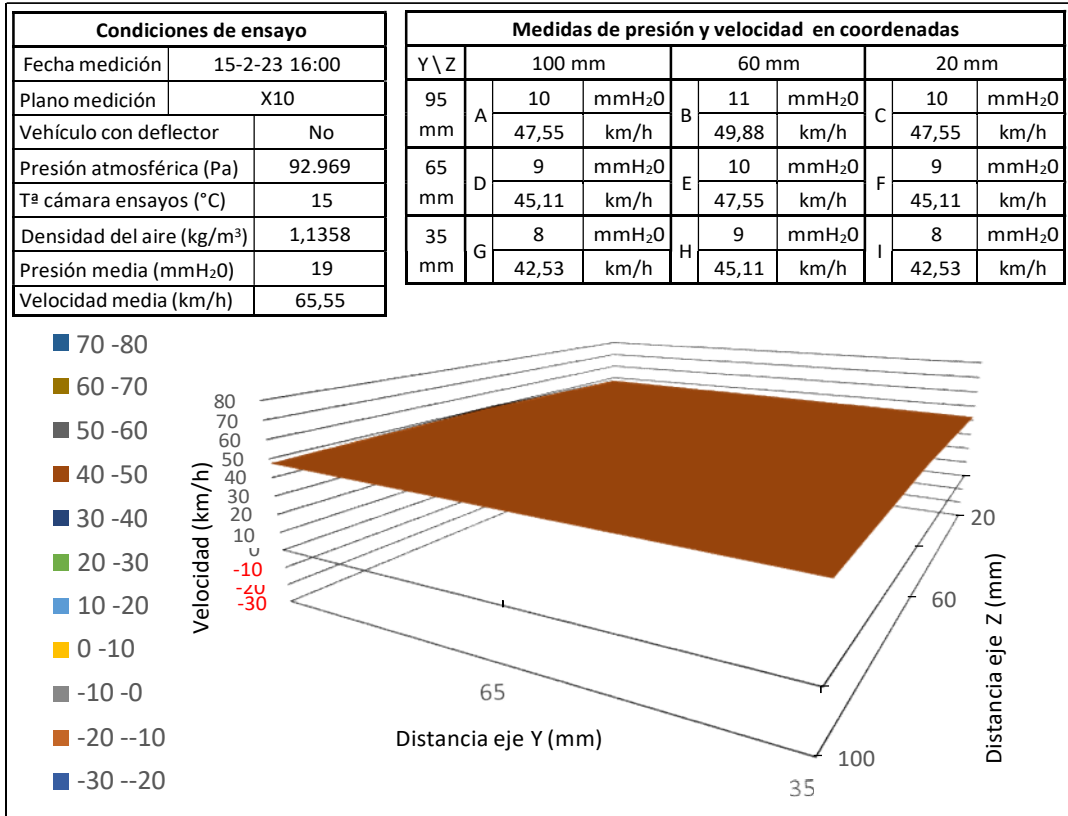
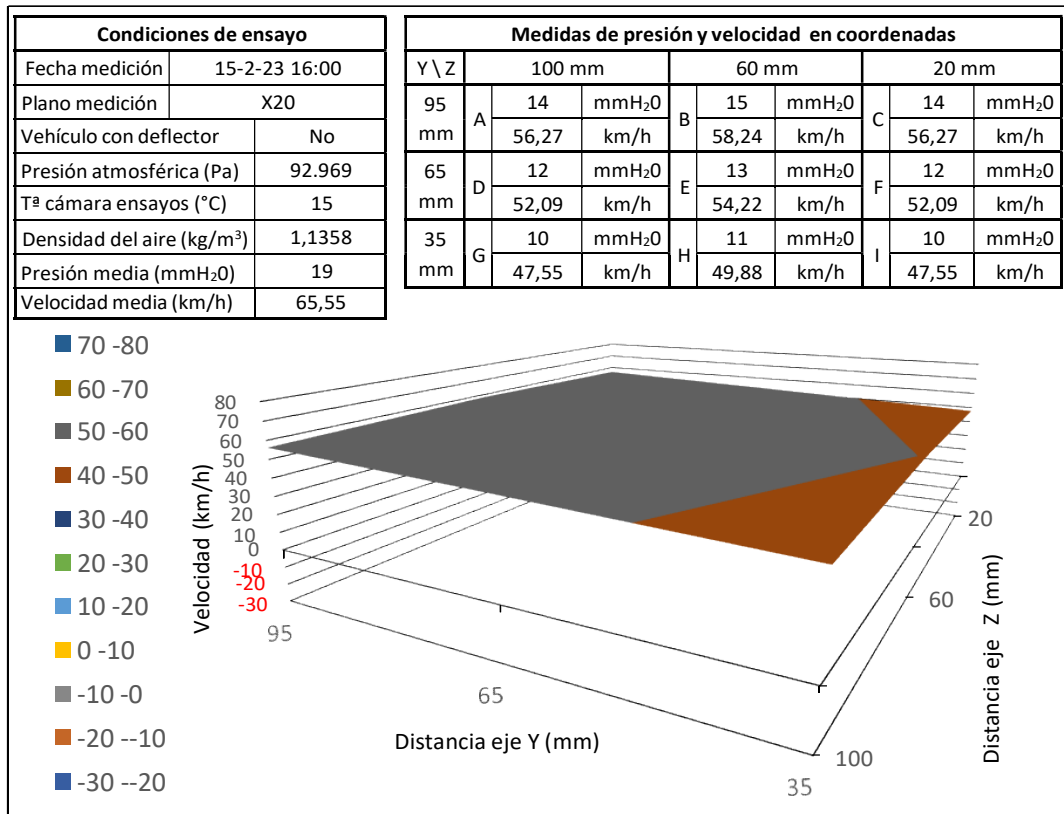
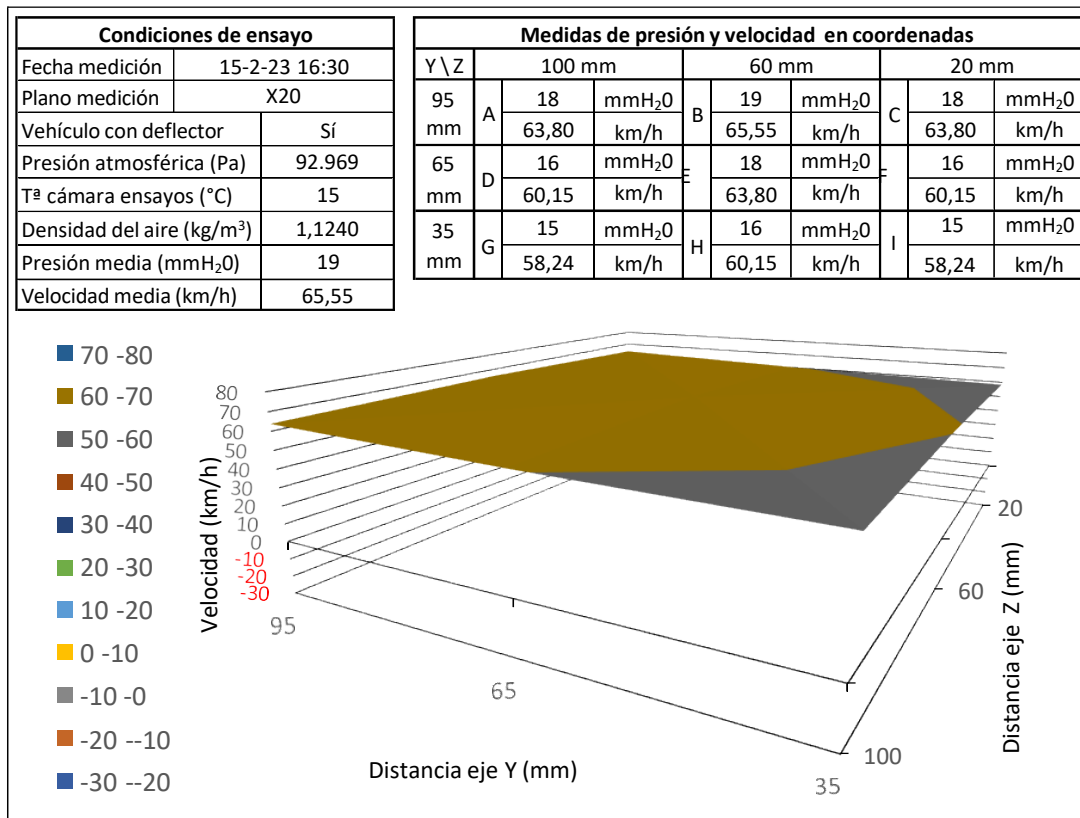


Figura 3.26. Resultados en plano X10: a) sin deflector, b) con deflector.

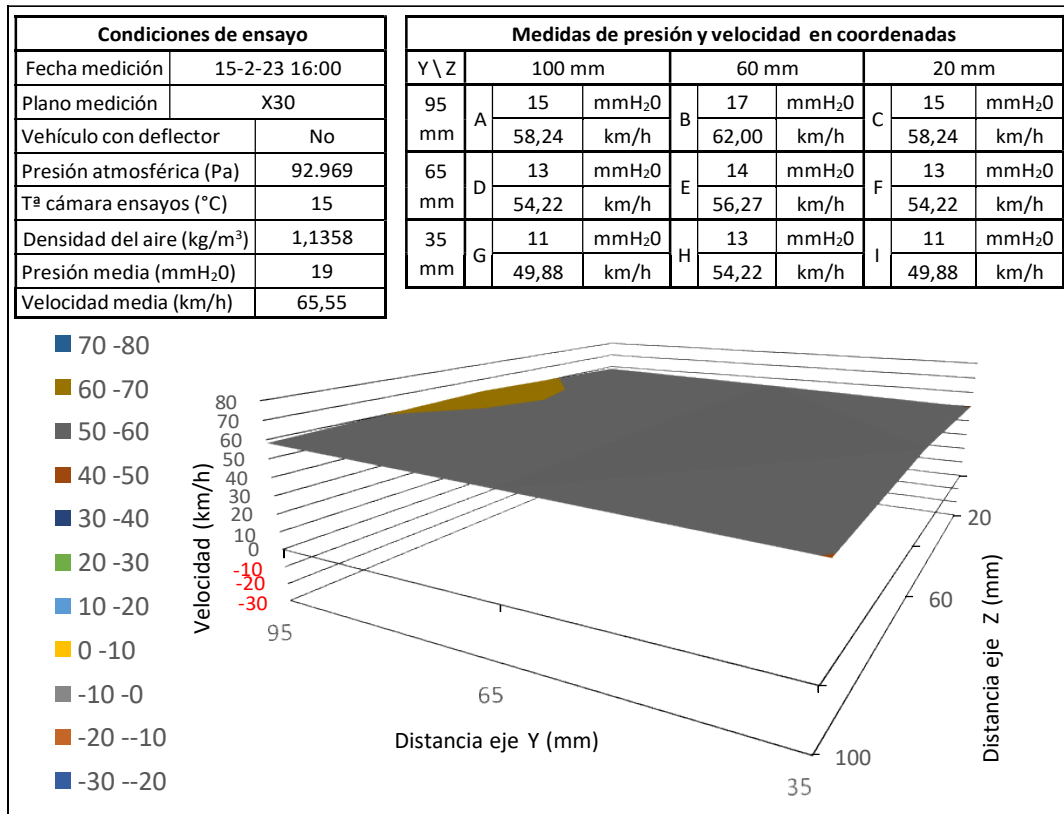


a)

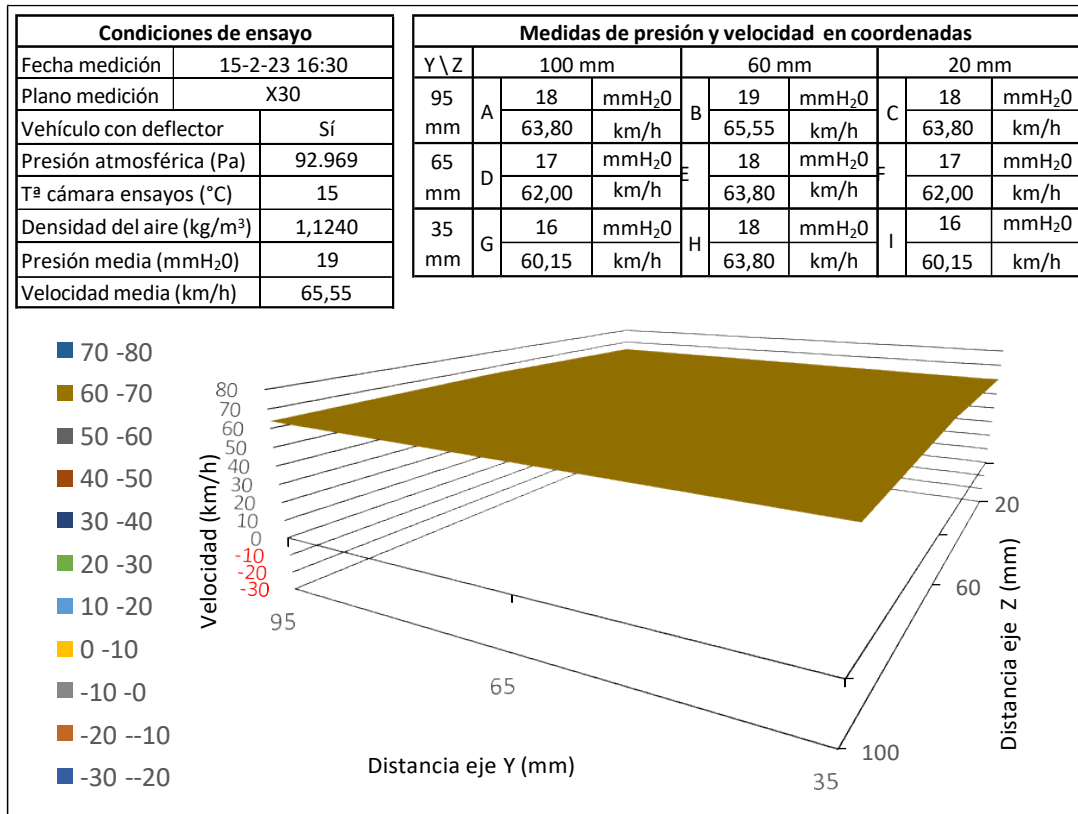


b)

Figura 3.27. Resultados en plano X20: a) sin deflector, b) con deflector.

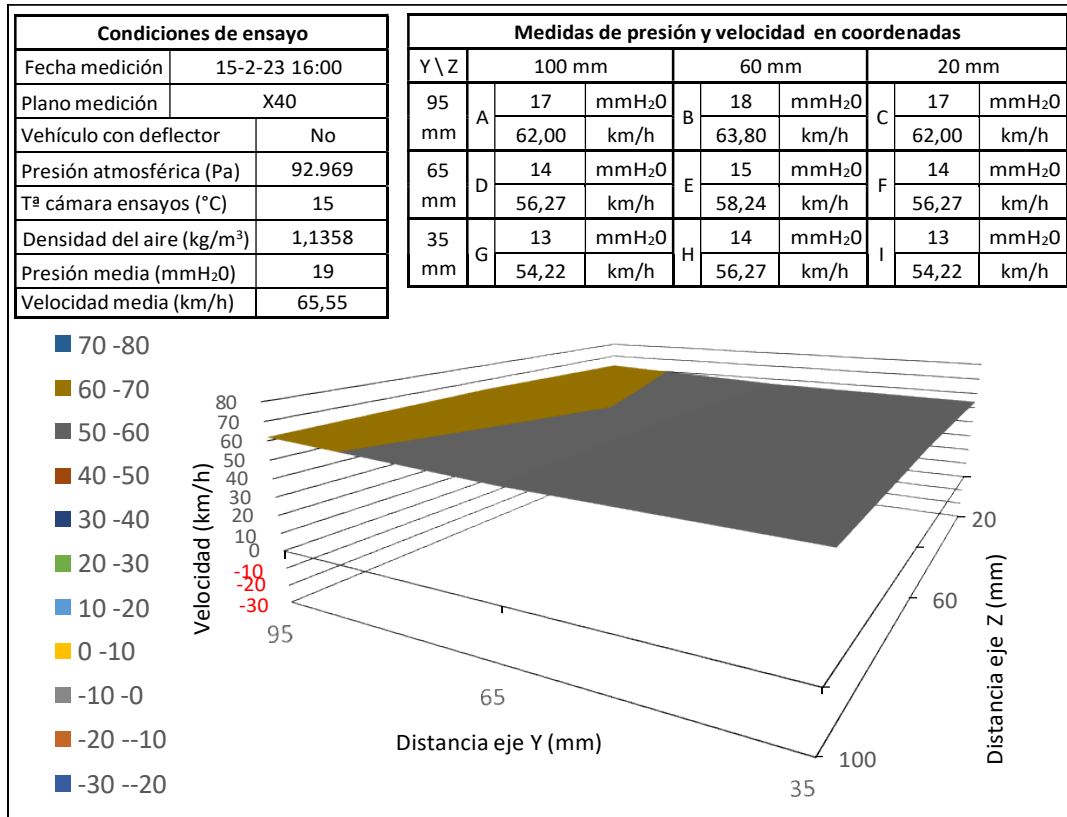


a)

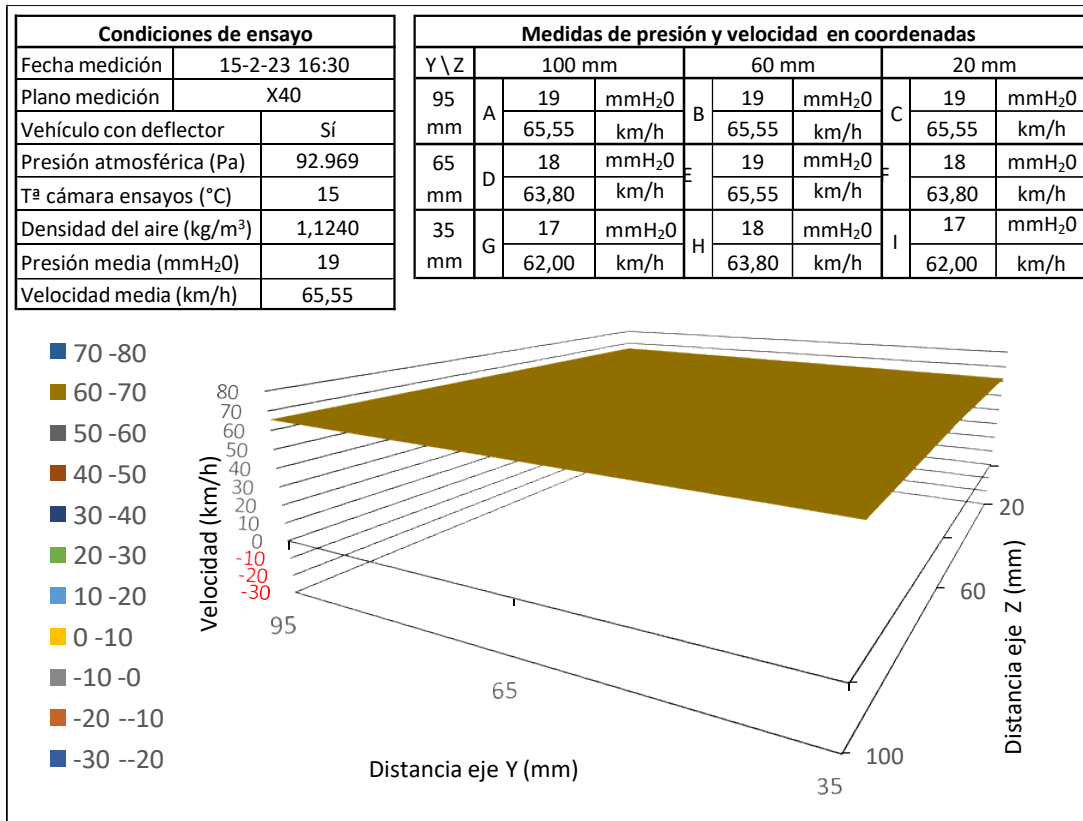


b)

Figura 3.28. Resultados en plano X30: a) sin deflector, b) con deflector.

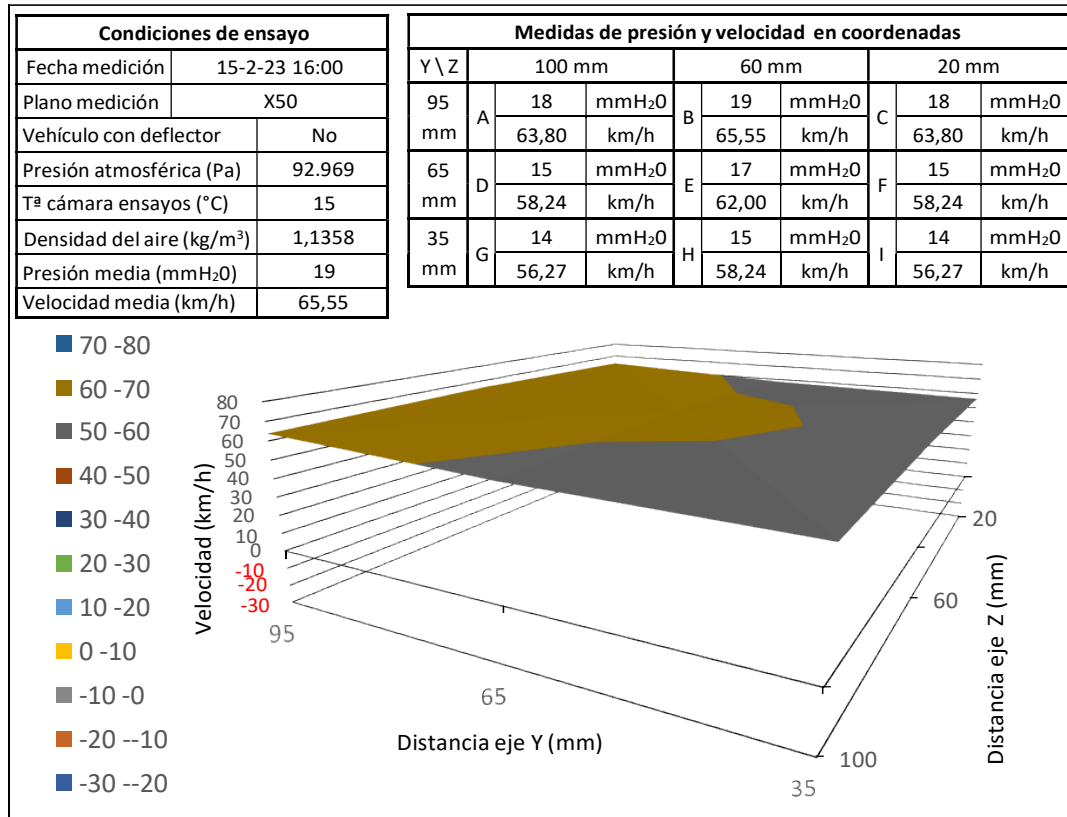


a)

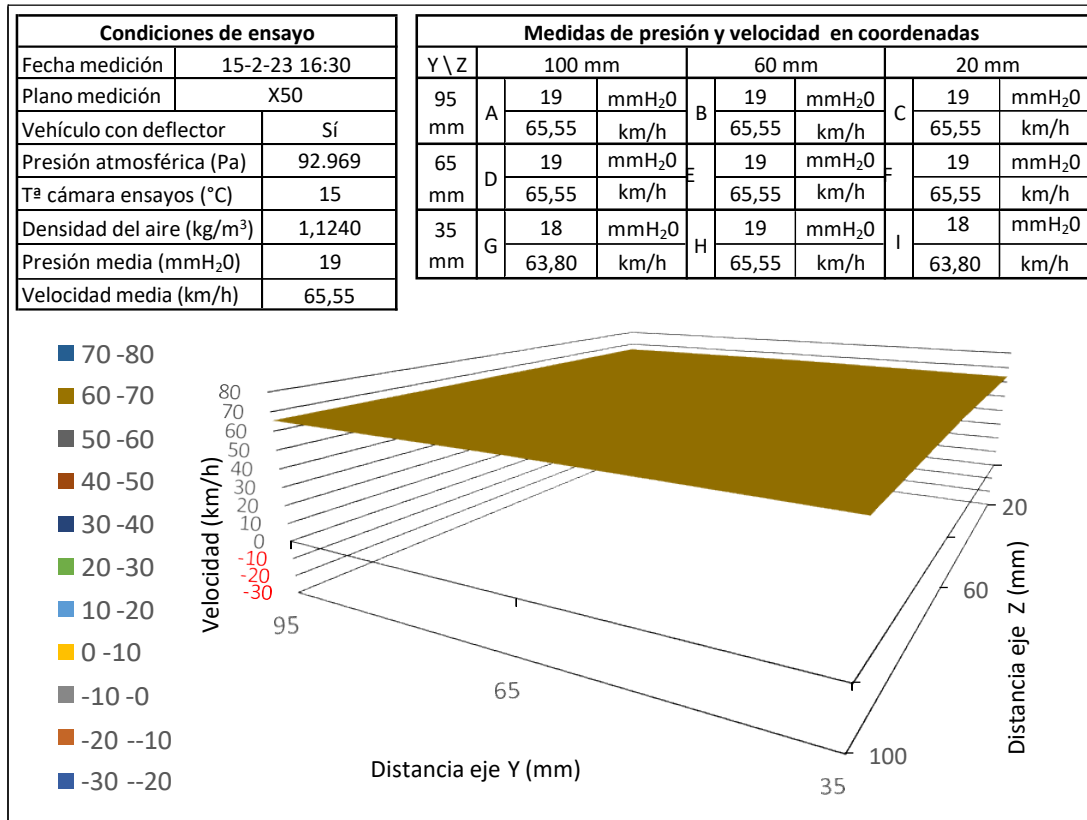


b)

Figura 3.29. Resultados en plano X40: a) sin deflector, b) con deflector.



a)



b)

Figura 3.30. Resultados en plano X50: a) sin deflector, b) con deflector.



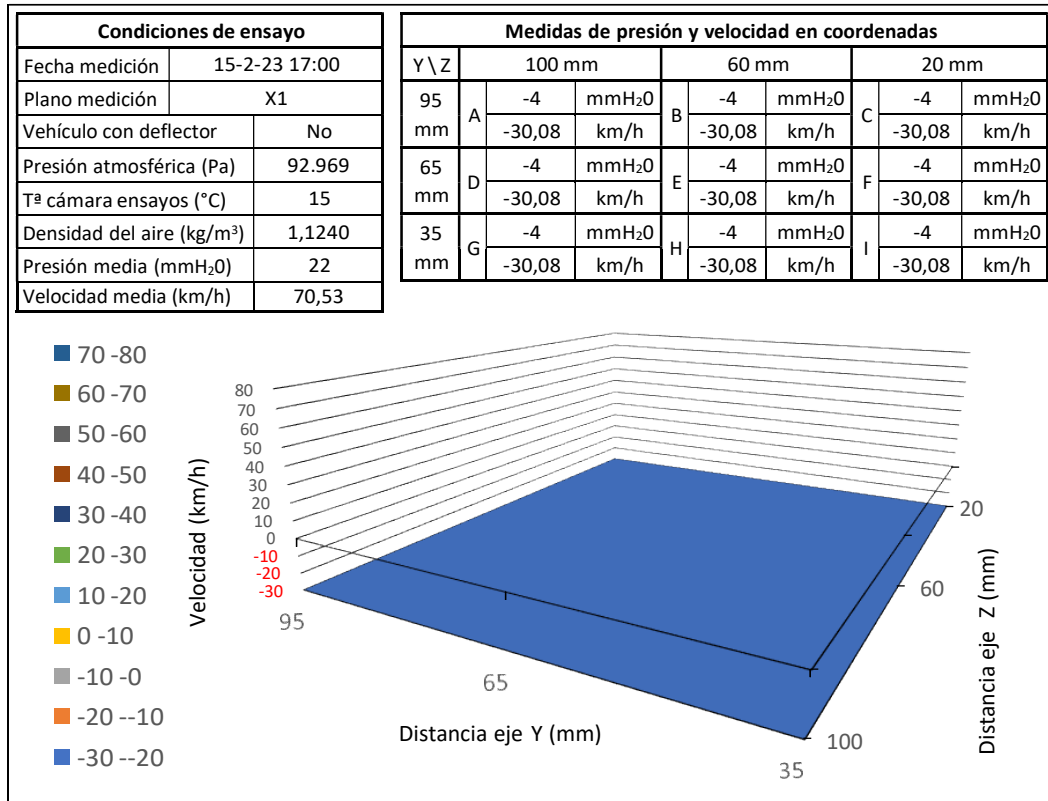
3.2.5. Velocidad de 71 km/h

Para el vehículo sin el sistema deflector, en el primer plano X1 ([Figura 3.31a](#)) la presión toma un valor de -4 mmH₂O en todos los puntos del plano, mientras que para el mismo plano X1 considerando que sí se incorpora el sistema deflector ([Figura 3.31b](#)), se aprecia el mismo efecto que se manifestaba en velocidades inferiores, no obstante, en esta nueva condición de ensayo, se detecta un gradiente superior, llegando a alcanzar valores de 16 mmH₂O en el punto B y descendiendo hasta el valor de 3 mmH₂O en los puntos G e I del mismo plano X1, de igual manera que ocurría para la velocidad de 65 km/h (presión de 19 mmH₂O) pero ahora con una ligera diferencia superior de presiones.

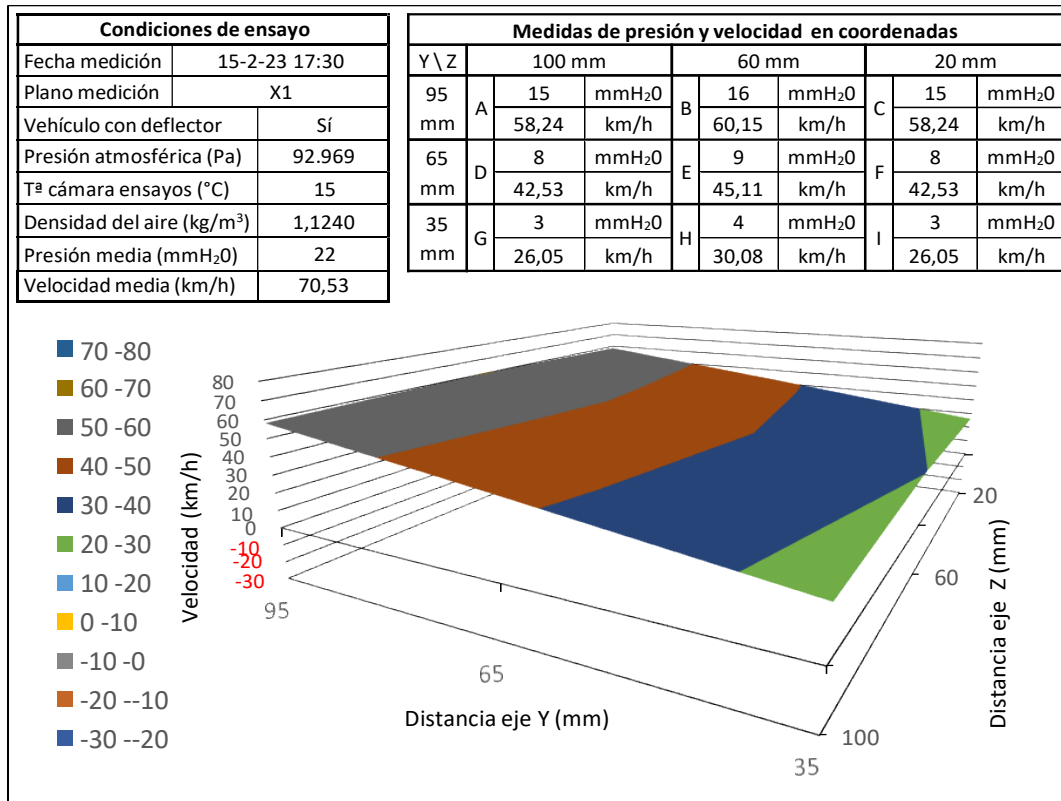
En el plano X5, se aprecia para el vehículo sin deflector ([Figura 3.32a](#)) el incremento de presión de forma general con valores ligeramente superiores en la coordenada Z60, respecto de las coordenadas Z20 y Z100 del eje Z, lo cual puede ser causado por presencia de vórtices, de igual forma que se comentaba en el mismo plano para la velocidad de 65 km/h.

Este efecto de presiones ligeramente superiores en la coordenada Z60 respecto del resto de puntos de los extremos laterales (coordenadas Z20 y Z100), se mantienen hasta el último plano medido X50, donde en este caso no llega a alcanzarse en ninguno de los puntos la presión media, siendo la más próxima la del punto B que es de 21 mmH₂O respecto de los 22 mmH₂O equivalentes a la velocidad de este ensayo de 71 km/h.

Por otro lado, en el vehículo con el sistema de canalización aerodinámico, los planos son homogéneos con pendiente decreciente en el eje Y, de igual forma que en la velocidad previa de 65 km/h, alcanzando el primer punto de velocidad con el medio en B al obtenerse una presión de 22 mmH₂O en el plano X30 ([Figura 3.35b](#)) e igualándose parcialmente en el último plano de medida X50 ([Figura 3.37b](#)).



a)

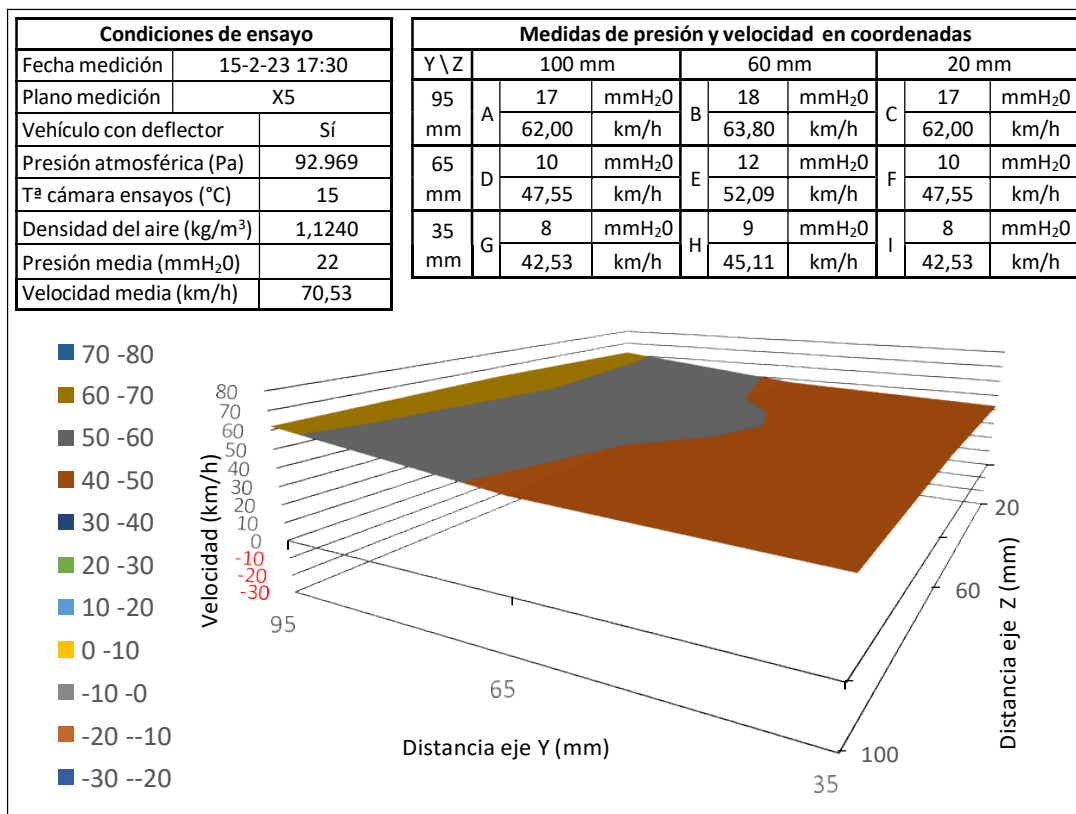


b)

Figura 3.31. Resultados en plano X1: a) sin deflector, b) con deflector.



a)

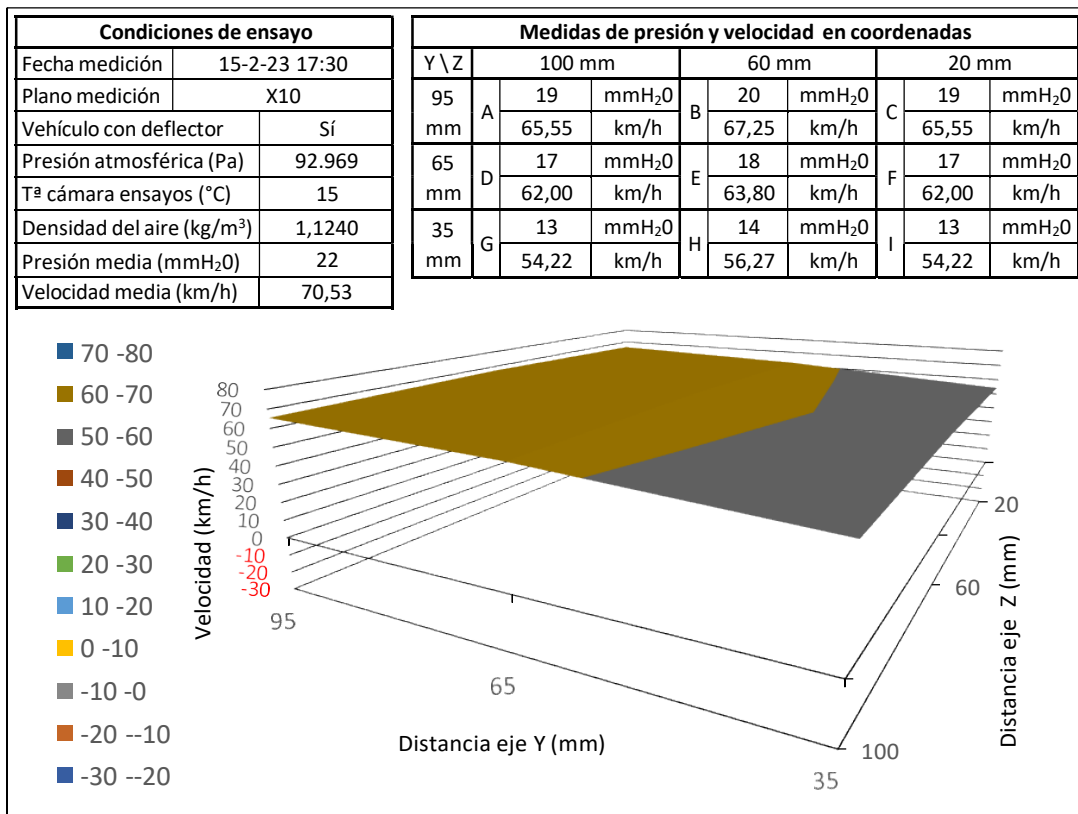


b)

Figura 3.32. Resultados en plano X5: a) sin deflector, b) con deflector.



a)

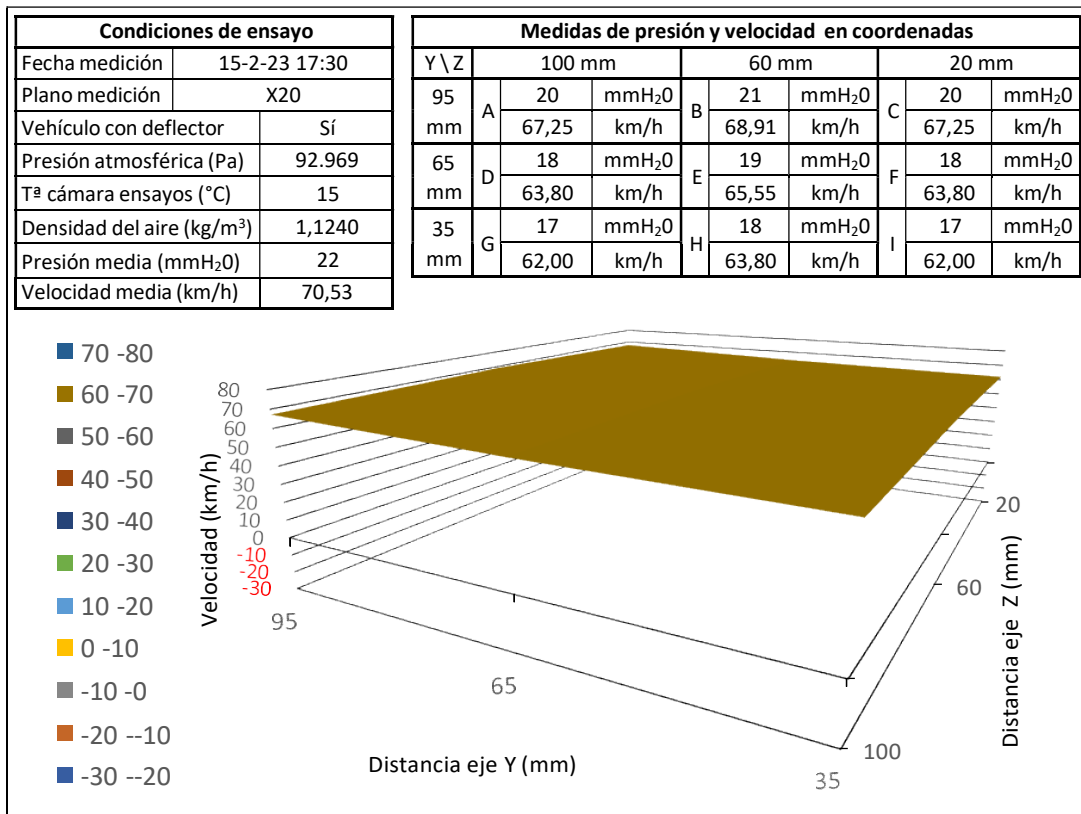


b)

Figura 3.33. Resultados en plano X10: a) sin deflector, b) con deflector.

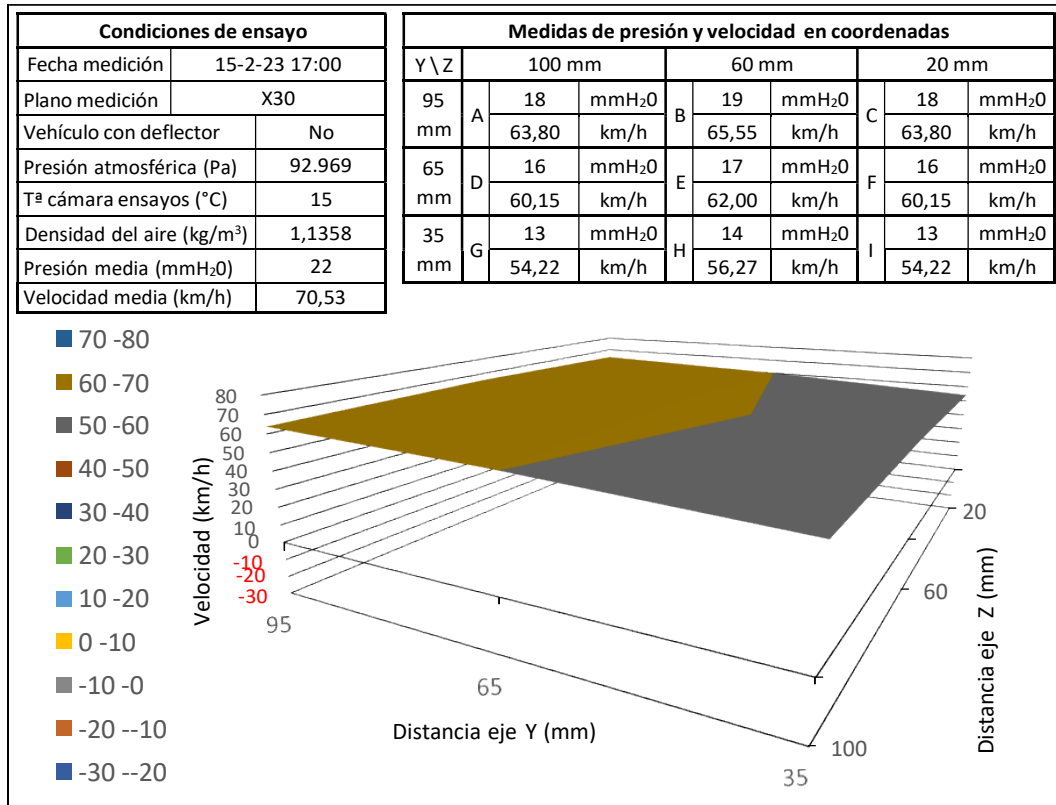


a)

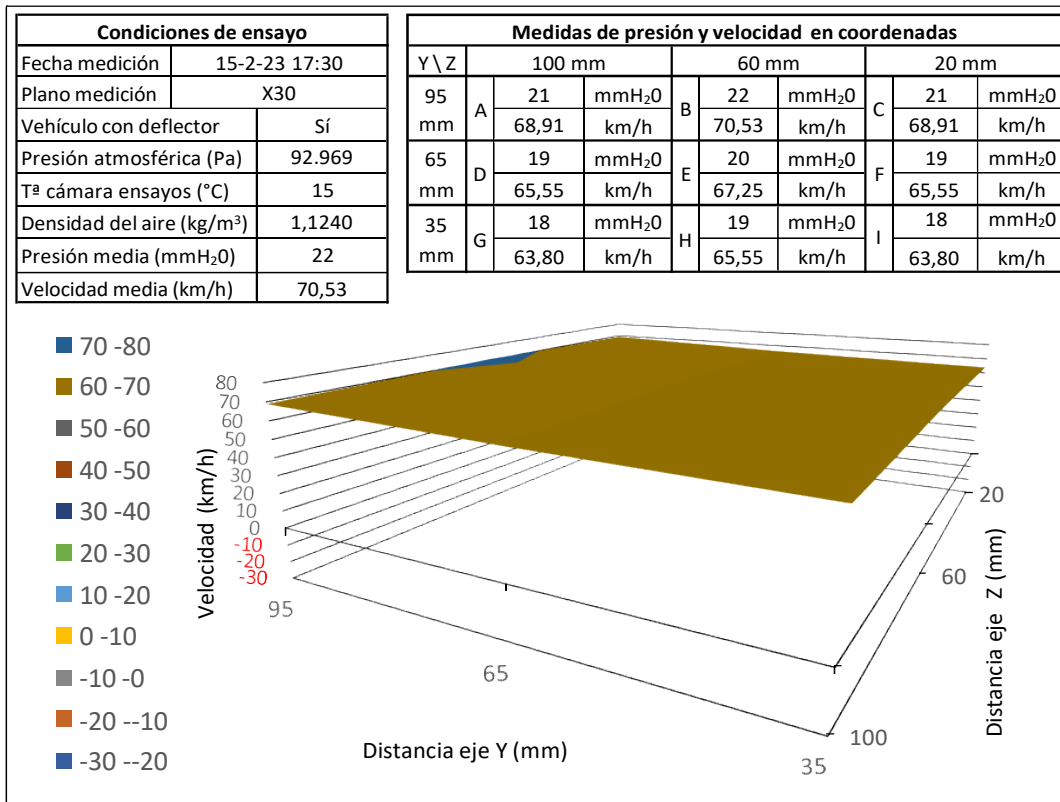


b)

Figura 3.34. Resultados en plano X20: a) sin deflector, b) con deflector.

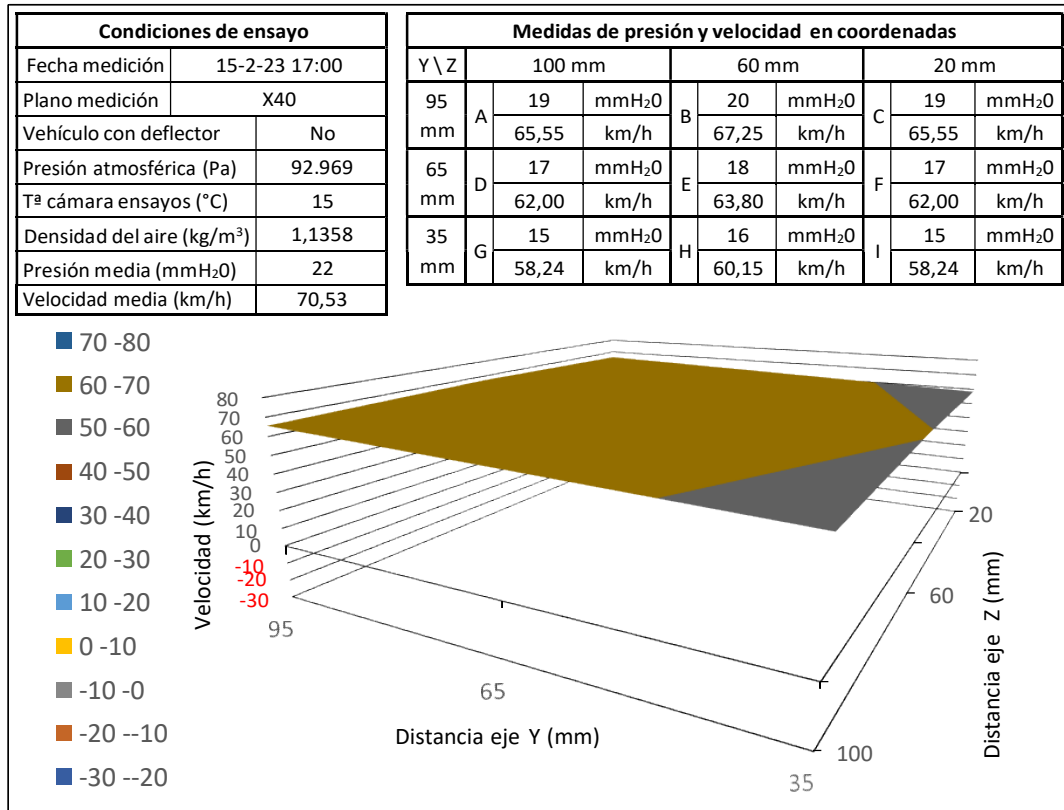


a)

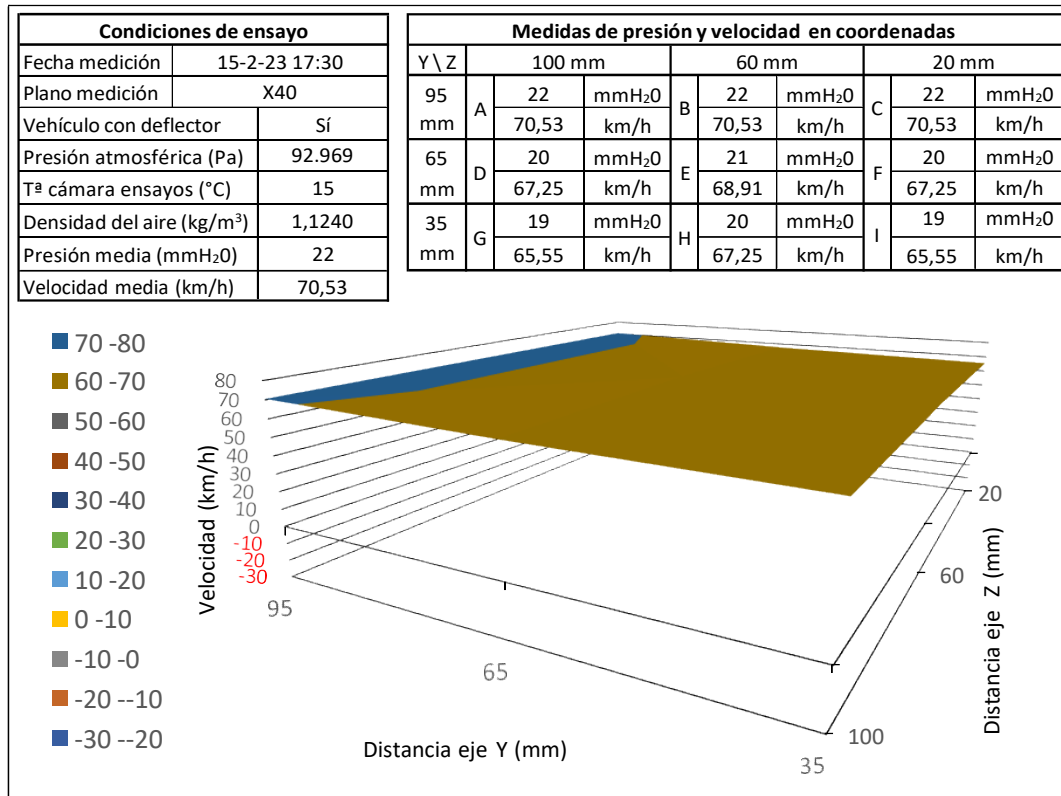


b)

Figura 3.35. Resultados en plano X30: a) sin deflector, b) con deflector.

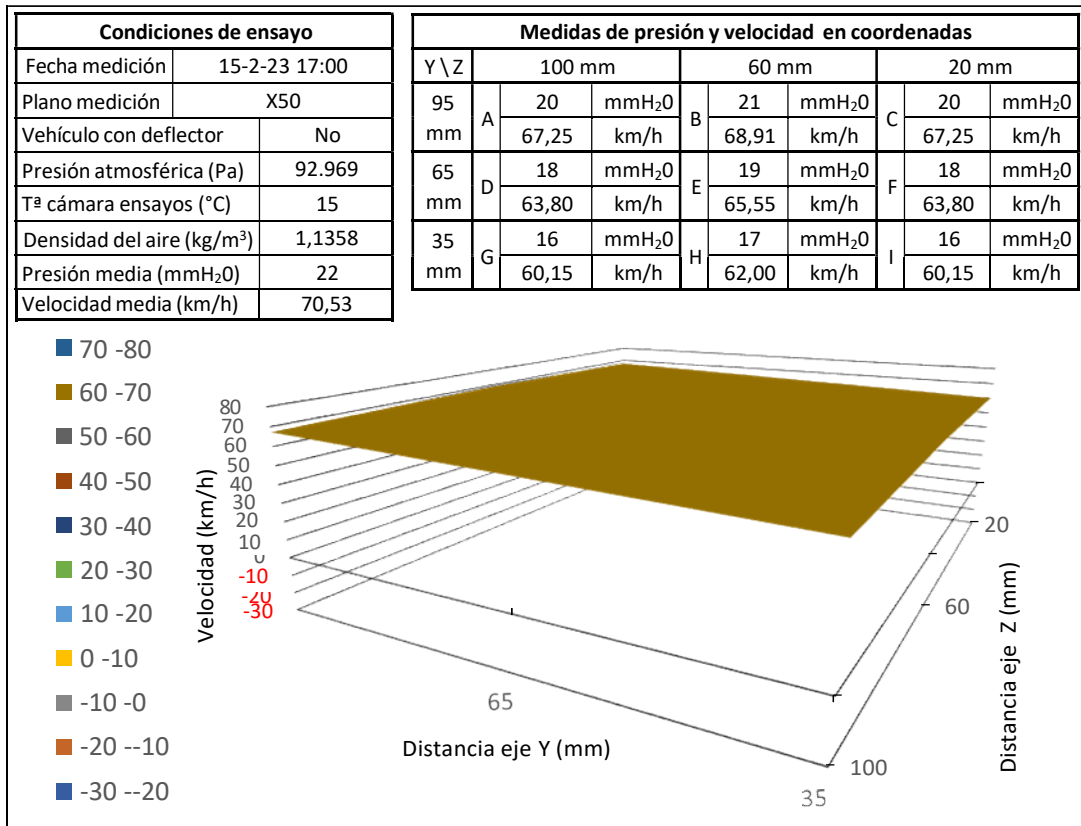


a)

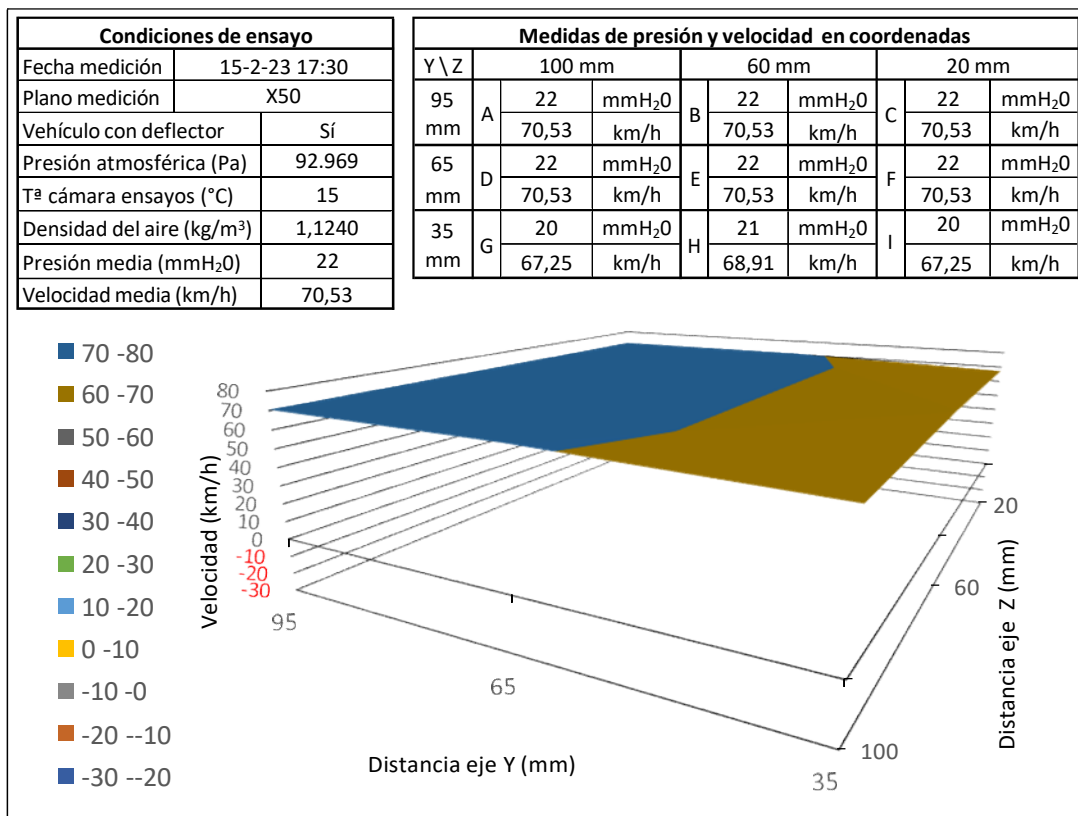


b)

Figura 3.36. Resultados en plano X40: a) sin deflector, b) con deflector.



a)



b)

Figura 3.37. Resultados en plano X50: a) sin deflector, b) con deflector.

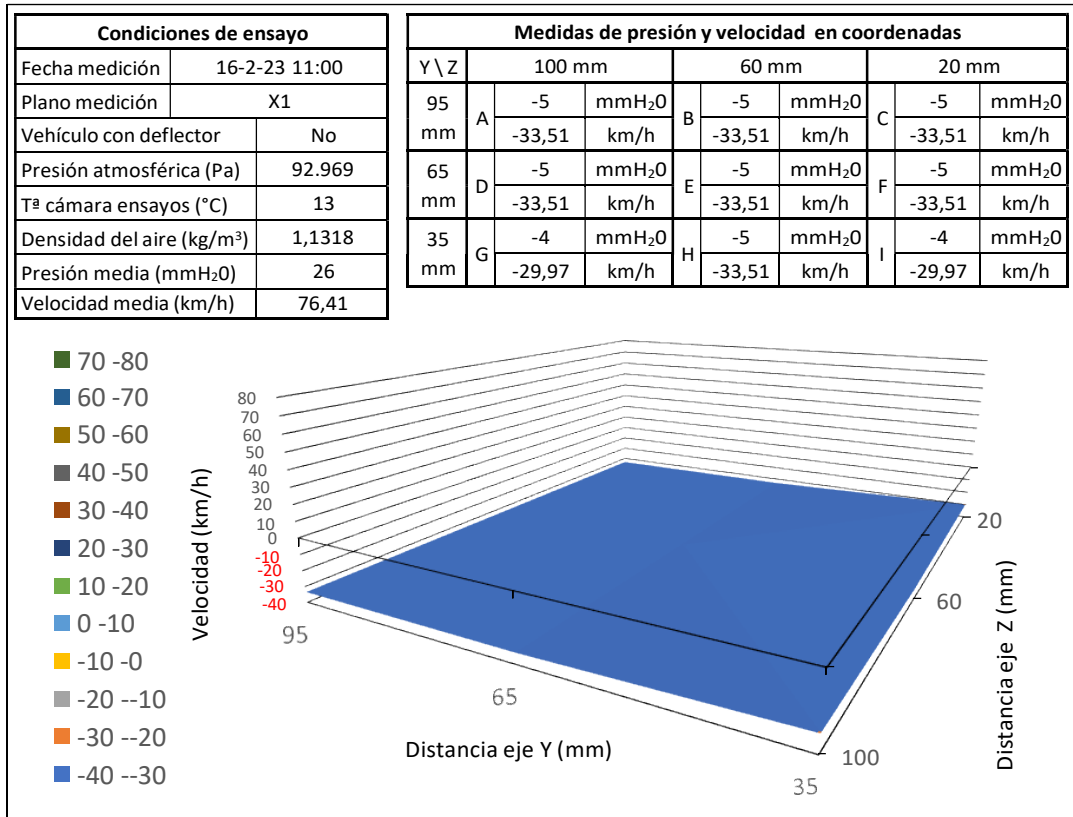


3.2.6. Velocidad de 76 km/h

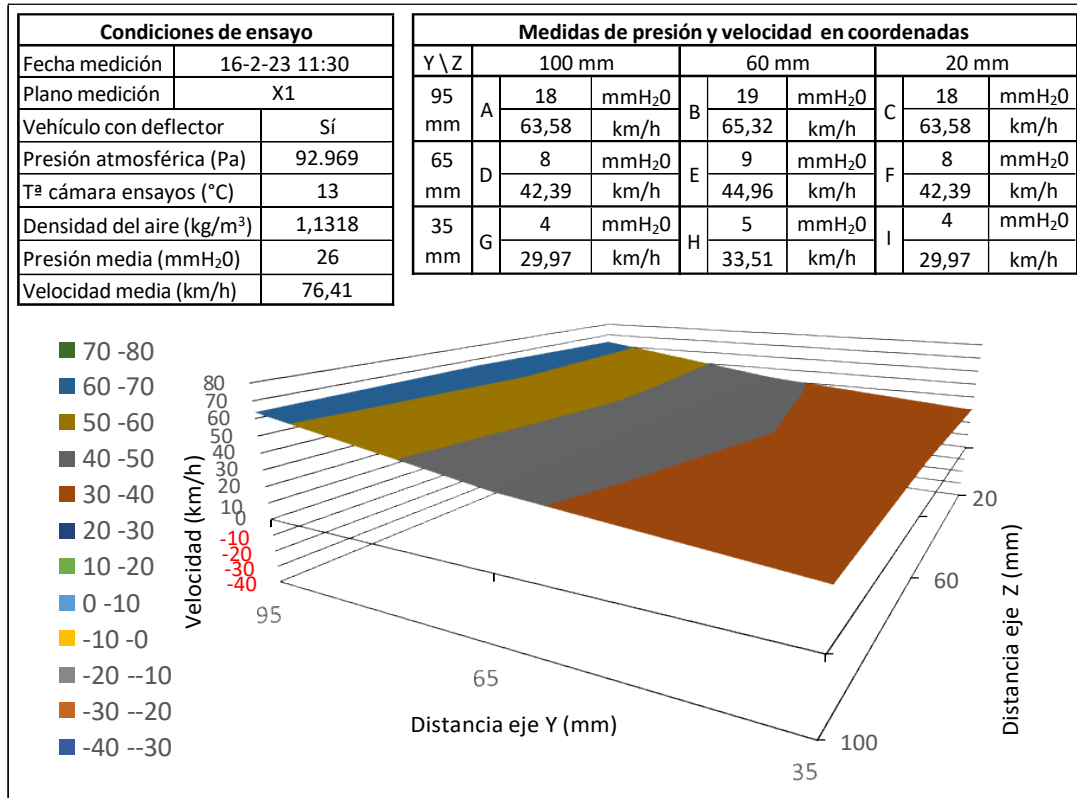
En el vehículo sin deflector se parte en el plano más próximo al vehículo X1 ([Figura 3.38a](#)) de valor de presión negativa de forma casi homogénea con valor de $-5 \text{ mmH}_2\text{O}$, excepto en dos puntos: G e I en los que se obtiene una presión de $-4 \text{ mmH}_2\text{O}$, causado probablemente por ligeras aportaciones de aire provenientes desde la parte inferior del vehículo.

Para el mismo plano X1 considerando el vehículo con el sistema deflector ([Figura 3.38b](#)), vuelve a existir al igual que en velocidades inferiores, un plano con pendiente decreciente desde los puntos de mayor valor de la coordenada Y95 hasta valores inferiores del eje Y en su coordenada Y35, en este caso con diferencias de $15 \text{ mmH}_2\text{O}$, es decir 36 km/h , lo que justifica nuevamente la aportación del sistema deflector y ahora más notoriamente

En los planos sucesivos X5, X10, X20, X30, X40 y X50 ([Figuras 3.38 – 3.44](#)) se repite la variación de valores, con incrementos en ambas condiciones de ensayo, sin y con el sistema deflector, llegando a alcanzar velocidades de 76 km/h (correspondiente a $26 \text{ mmH}_2\text{O}$) en el vehículo con deflector en el punto B del plano X50 ([Figura 3.44b](#)), mientras que para el vehículo sin deflector ([Figura 3.44a](#)) el valor máximo alcanzado es de 72 km/h (equivalente a $23 \text{ mmH}_2\text{O}$), de modo que, se puede concluir que para esta velocidad la presión se unifica con el medio en un plano posterior, repercutiendo el efecto de vacío en una mayor distancia.

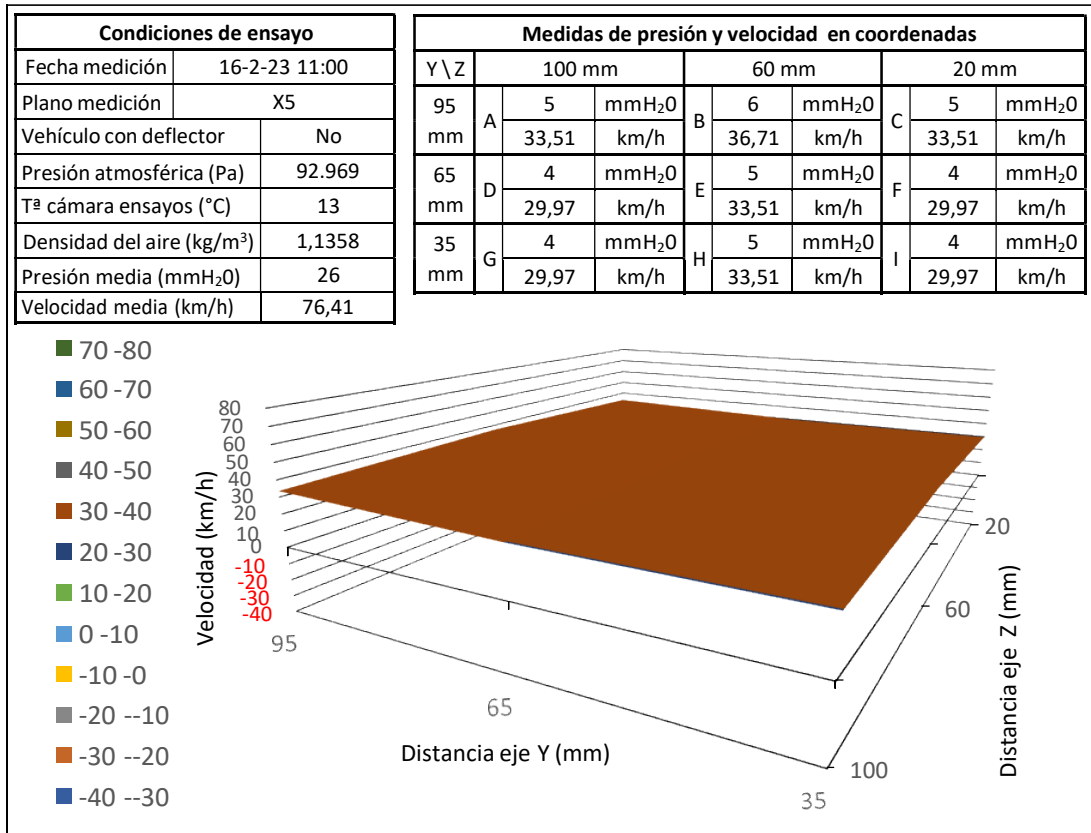


a)

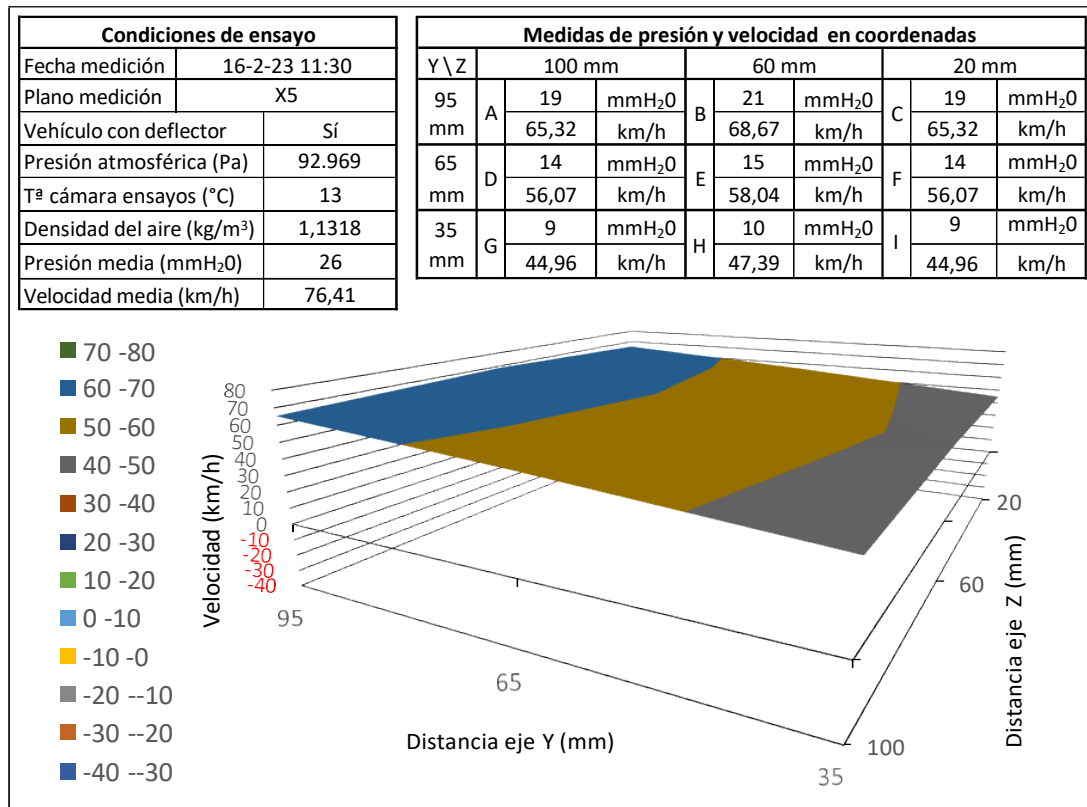


b)

Figura 3.38. Resultados en plano X1: a) sin deflector, b) con deflector.

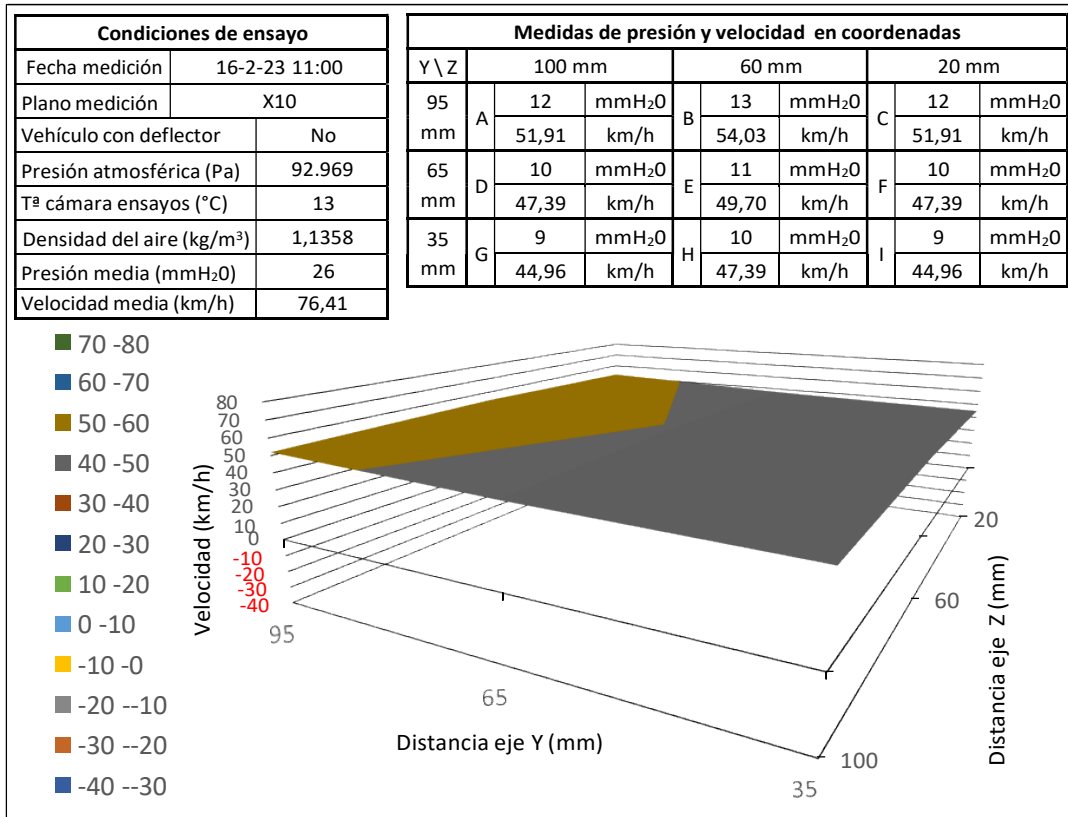


a)

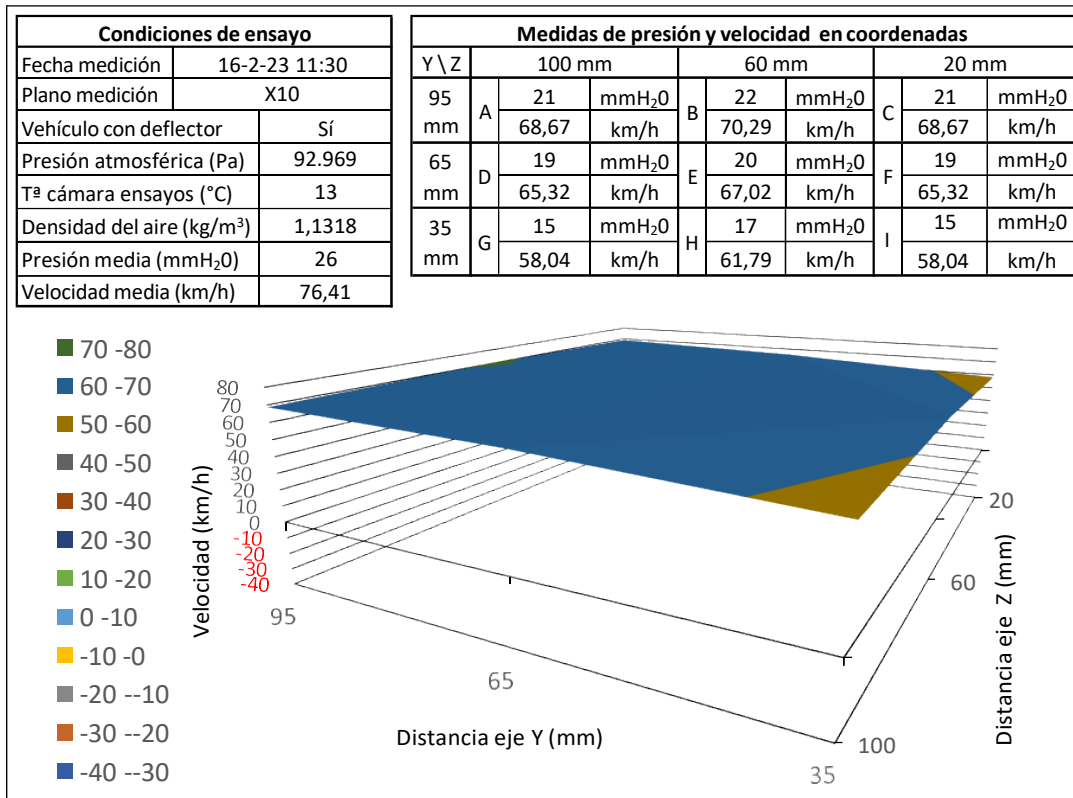


b)

Figura 3.39. Resultados en plano X5: a) sin deflector, b) con deflector.

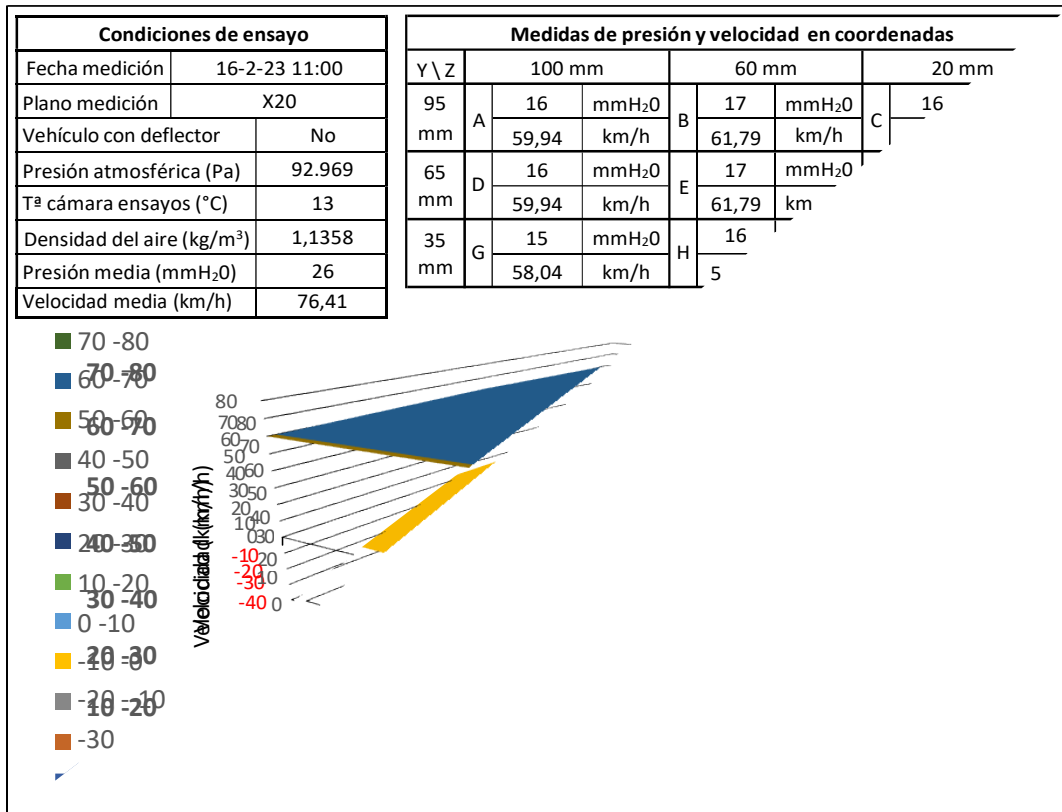


a)

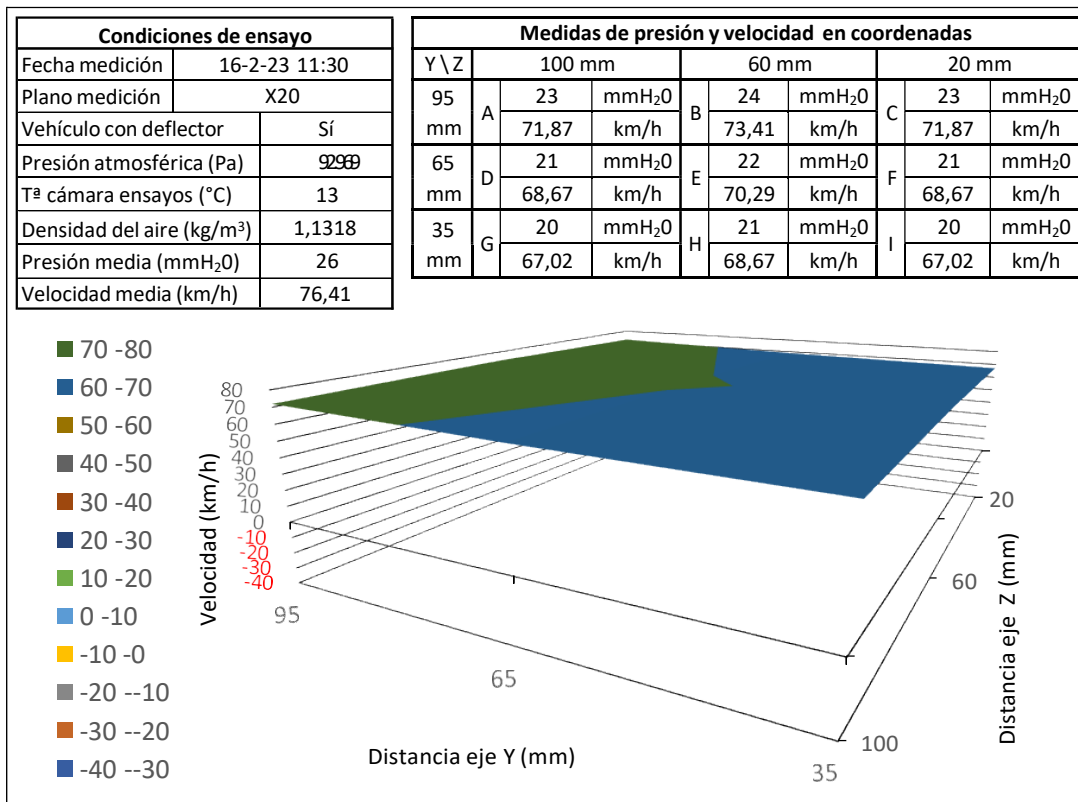


b)

Figura 3.40. Resultados en plano X10: a) sin deflector, b) con deflector.

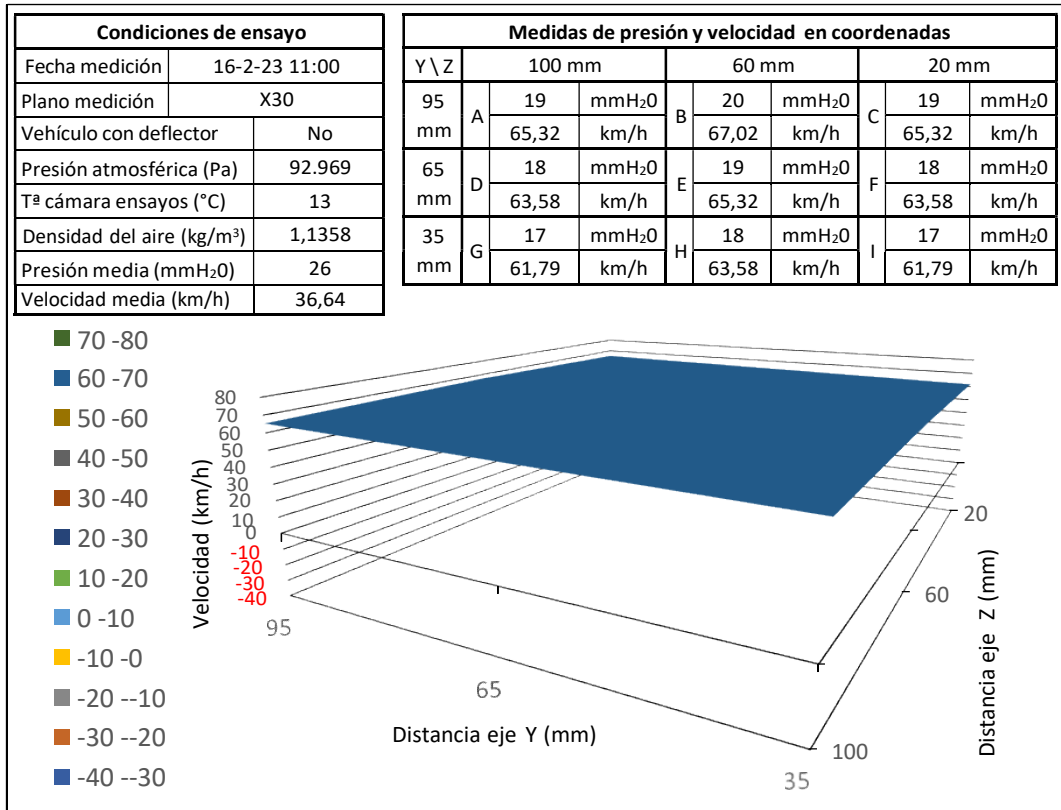


a)

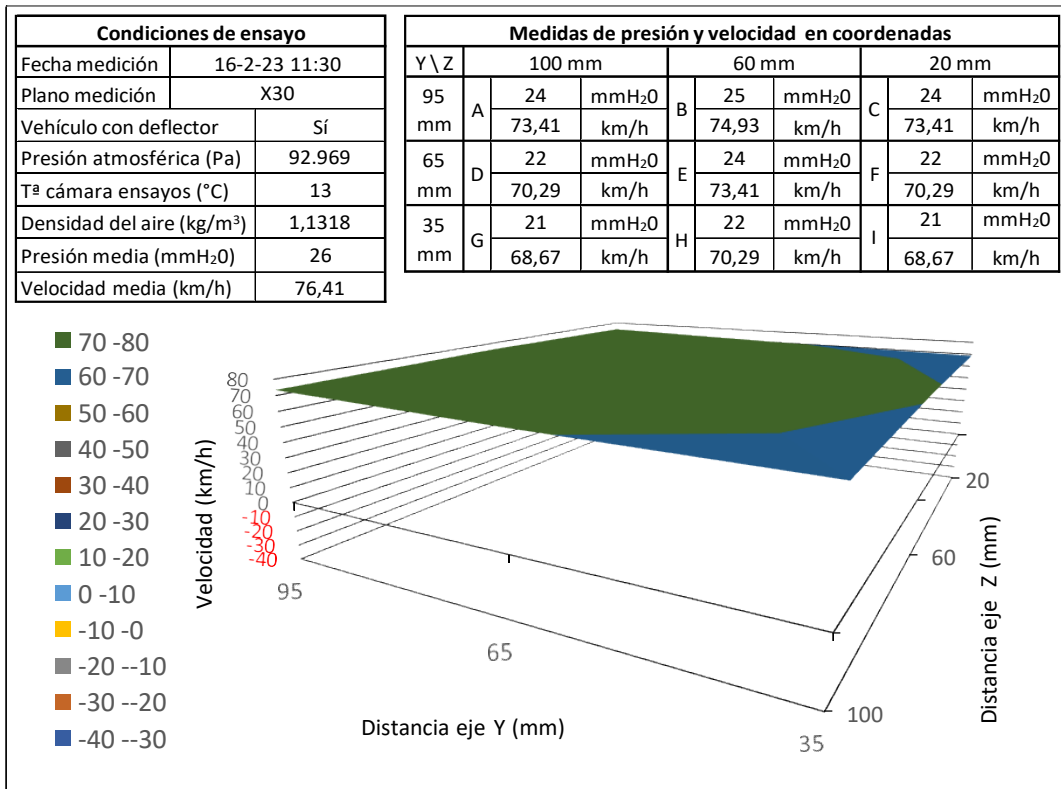


b)

Figura 3.41. Resultados en plano X20: a) sin deflector, b) con deflector.

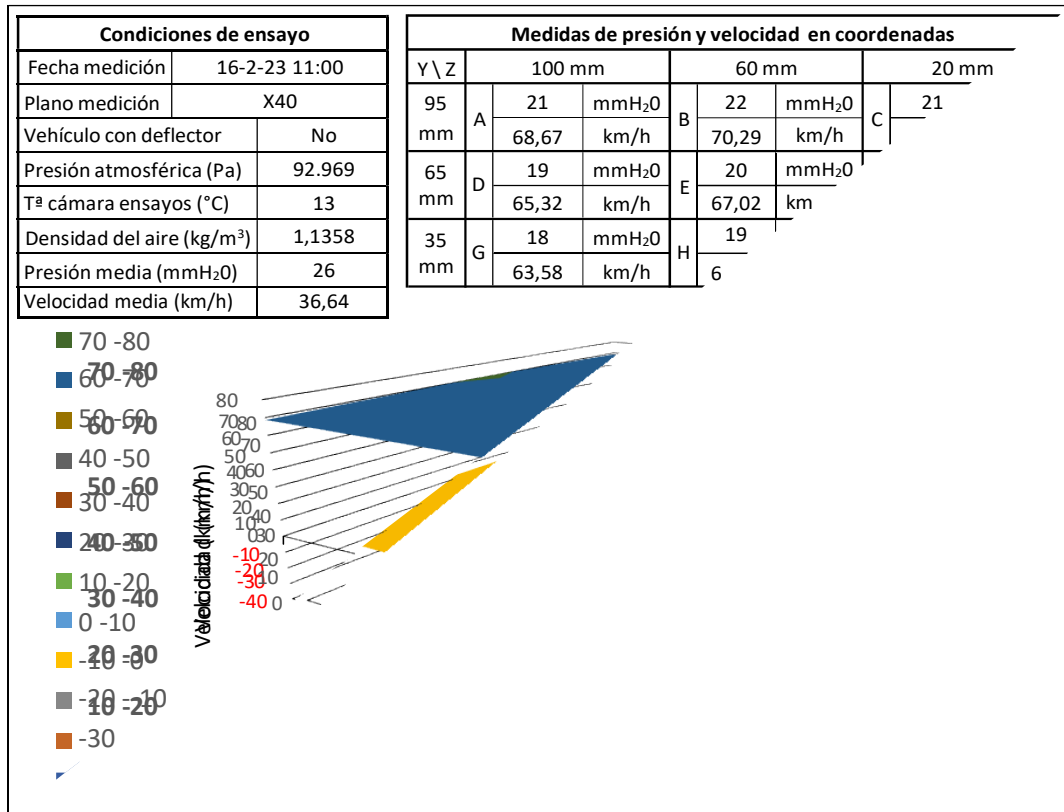


a)

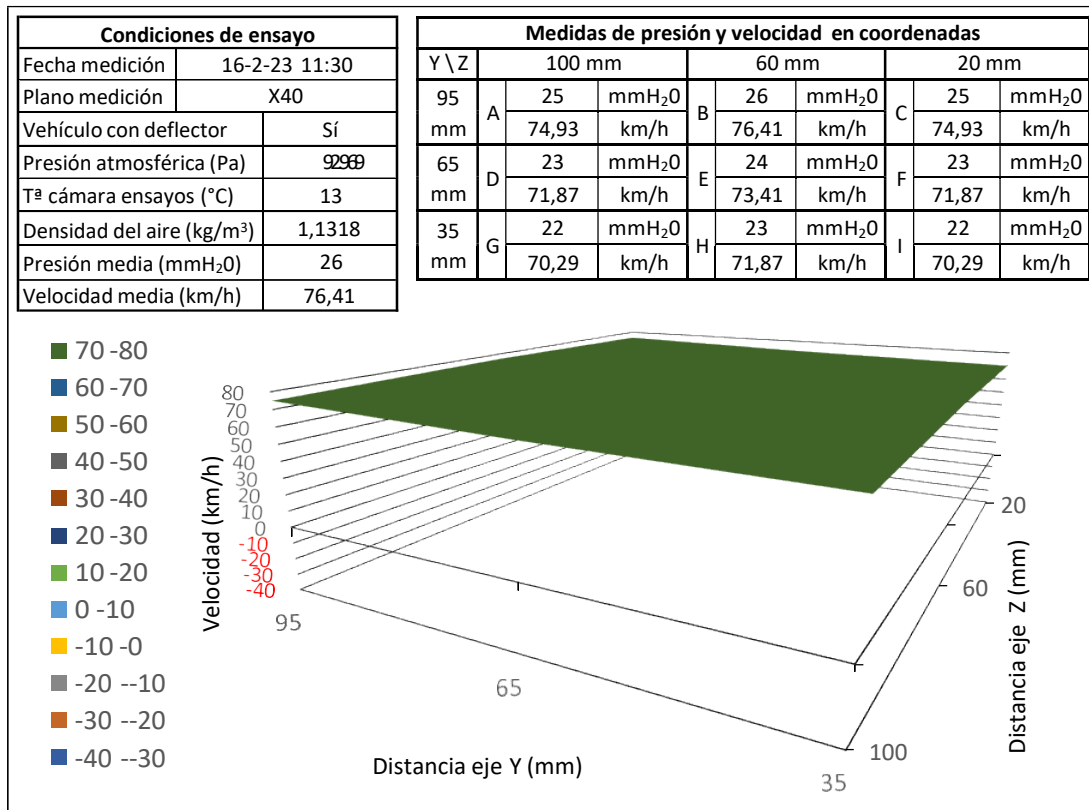


b)

Figura 3.42. Resultados en plano X30: a) sin deflector, b) con deflector.



a)



b)

Figura 3.43. Resultados en plano X40: a) sin deflector, b) con deflector.

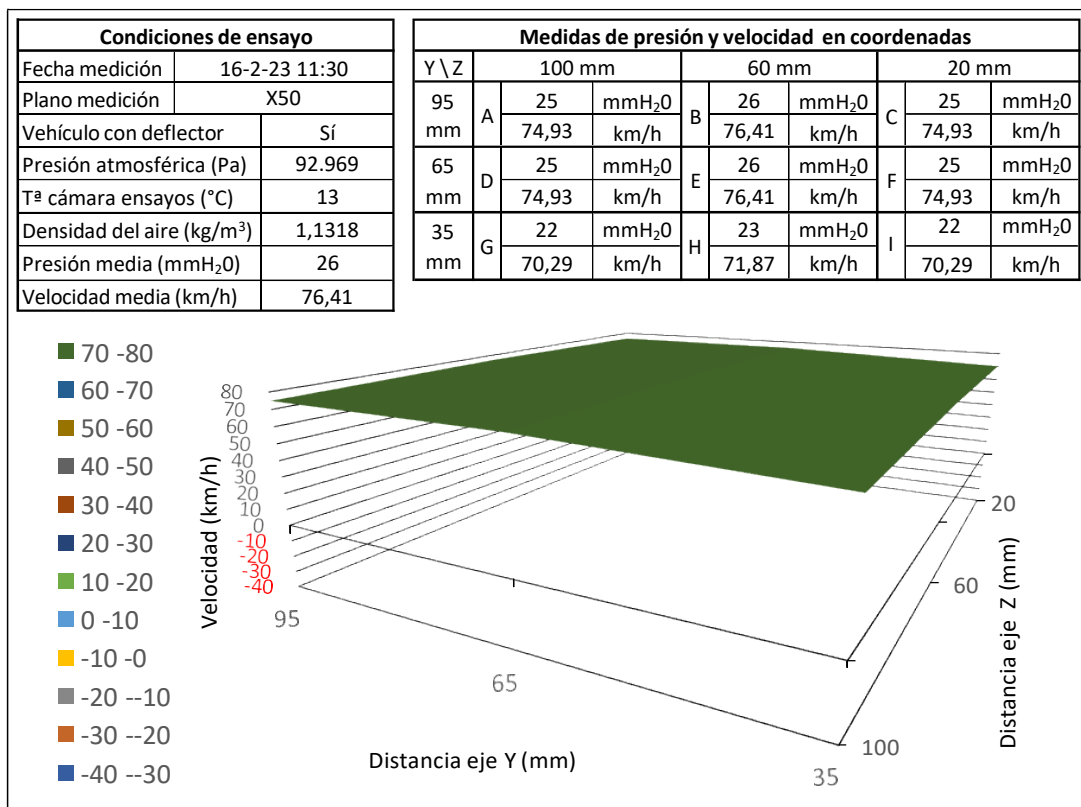
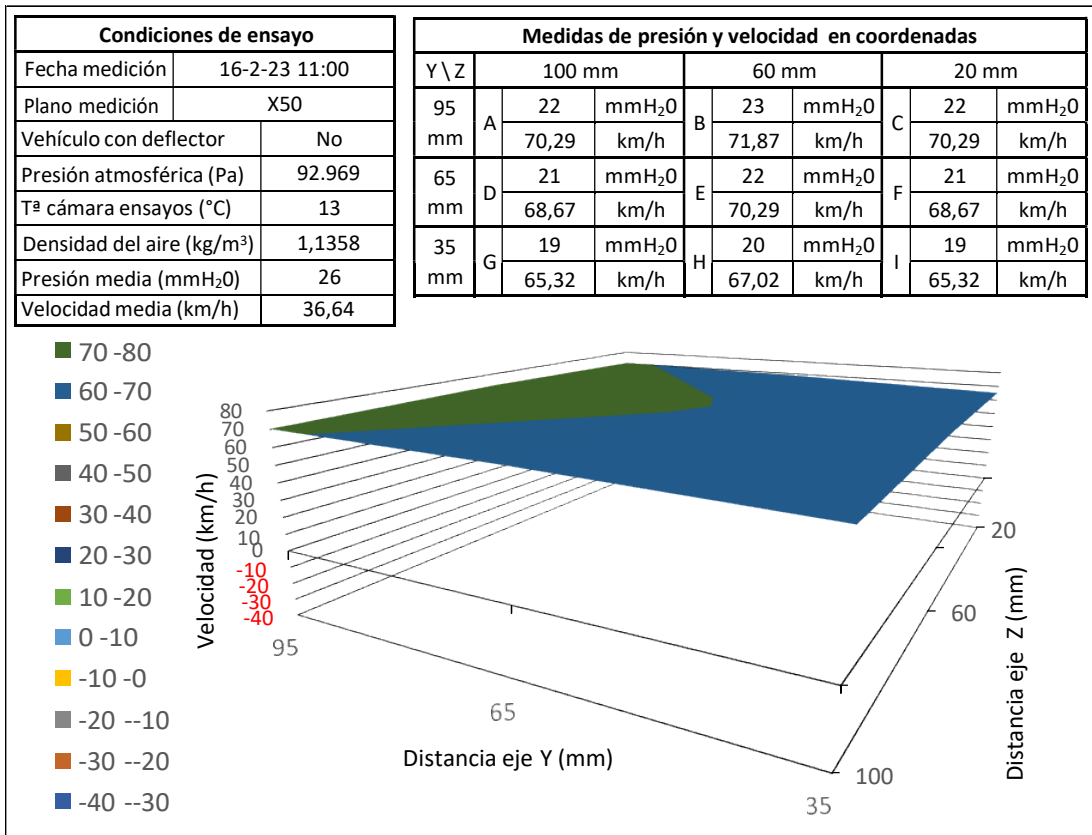


Figura 3.44. Resultados en plano X50: a) sin deflector, b) con deflector.



3.2.7. Análisis global de todas las velocidades

Finalmente, se hace un análisis general de la totalidad de las gráficas presentadas previamente para cada una de las 6 velocidades evaluadas, de modo que, de forma general se desprende del análisis que, para el vehículo sin el sistema deflector, en los planos X1 existen valores negativos de presión, mientras que en el vehículo con el sistema deflector en el mismo plano X1, los valores son positivos y con una notoria aportación en los puntos de valor de eje Y más elevados (puntos A, B y C), motivados por la aportación de aire proveniente del sistema de canalización aerodinámico, que cubren la zona de vacío generada en el vehículo sin esta incorporación de mejora.

En el resto de planos siguientes, se aprecia para ambas maquetas (sin y con sistema deflector) un incremento gradual de presiones con planos con gradiente decreciente de los puntos A-B-C, a D-E-F y G-H-I respectivamente, es decir, existen presiones superiores en los planos más elevados verticalmente. De la misma forma, se sigue el modelo de valores ligeramente superiores en los puntos de la coordenada Z60, respecto de las coordenadas Z20 y Z100 del eje Z de cada uno de los planos, en el caso del modelo con deflector motivado por las aportaciones del deflector en la parte central, mientras que para el vehículo sin deflector, es posible que este efecto se deba a la generación de vórtices al desprender el aire en la capa límite de los laterales del vehículo que generan una medida de presión inferior en los extremos frente a los puntos centrales.

Por otro lado, en la [Tabla 3.1](#) se muestran agrupados los valores resultantes, de modo que se indica la presión de cada punto, así como la comparativa con y sin deflector en cada uno de ellos. En este sentido, el estudio se estructura en 6 bloques: (i) velocidad suministrada por el túnel de viento a la maqueta situada en la cámara de ensayos; (ii) distancia a la que se mide respecto del final del vehículo; (iii) altura respecto del suelo a la que se toman los valores; (iv) 135 valores de presión medidos con la maqueta convencional sin deflector; (v) 135 valores de presión con la incorporación del sistema deflector a la maqueta; (iv) comparativa en cada uno de los 9 puntos medidos de la presión con deflector (β) y sin deflector (α), indicándose la respectiva diferencia de presión ($\beta-\alpha$) en cada punto de medición.


Tabla 3.1. Comparativa de presiones resultantes sin y con deflector.

Punto del plano	X (cm)	v (km/h)	Y (mm)	P_{α} (mmH ₂ O)			P_{β} (mmH ₂ O)			$P_{\beta} - P_{\alpha}$ (mmH ₂ O)		
				Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20
A-B-C	1	36,44	95	-1	-1	-1	5	6	5	6	7	6
D-E-F			65	-1	-2	-1	2	3	2	3	5	3
G-H-I			35	-1	-1	-1	1	1	1	2	2	2
A-B-C	5		95	0	-1	0	5	6	5	5	7	5
D-E-F			65	-1	-2	-1	4	5	4	5	7	5
G-H-I			35	0	0	0	3	4	3	3	4	3
A-B-C	10		95	2	2	2	6	6	6	4	4	4
D-E-F			65	1	2	1	6	6	6	5	4	5
G-H-I			35	1	2	1	5	5	5	4	3	4
A-B-C	20		95	3	4	3	6	6	6	3	2	3
D-E-F			65	3	4	3	6	6	6	3	2	3
G-H-I			35	2	3	2	6	6	6	4	3	4
A-B-C	30		95	4	5	4	6	6	6	2	1	2
D-E-F			65	4	5	4	6	6	6	2	1	2
G-H-I			35	3	4	3	6	6	6	3	2	3
A-B-C	40		95	5	6	5	6	6	6	1	0	1
D-E-F			65	4	5	4	6	6	6	2	1	2
G-H-I			35	4	5	4	6	6	6	2	1	2
A-B-C	50	95	6	6	6	6	6	6	0	0	0	
D-E-F		65	6	6	6	6	6	6	0	0	0	
G-H-I		35	5	6	5	6	6	6	1	0	1	

**Tabla 3.1 (cont.).** Comparativa de presiones resultantes sin y con deflector.

Punto del plano	X (cm)	v (km/h)	Y (mm)	P_{α} (mmH ₂ O)			P_{β} (mmH ₂ O)			$P_{\beta} - P_{\alpha}$ (mmH ₂ O)		
				Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20
A-B-C	1	42,31	95	-1	-1	-1	6	7	6	7	8	7
D-E-F			65	-1	-1	-1	3	5	3	4	6	4
G-H-I			35	-2	-2	-2	2	3	2	4	5	4
A-B-C	5		95	1	1	1	8	8	8	7	7	7
D-E-F			65	1	1	1	5	6	5	4	5	4
G-H-I			35	0	0	0	4	5	4	4	5	4
A-B-C	10		95	4	5	4	8	8	8	4	3	4
D-E-F			65	3	4	3	7	8	7	4	4	4
G-H-I			35	2	3	2	6	7	6	4	4	4
A-B-C	20		95	5	6	5	8	8	8	3	2	3
D-E-F			65	5	6	5	8	8	8	3	2	3
G-H-I			35	3	4	3	7	8	7	4	4	4
A-B-C	30		95	6	7	6	8	8	8	2	1	2
D-E-F			65	5	6	5	8	8	8	3	2	3
G-H-I			35	4	5	4	8	8	8	4	3	4
A-B-C	40		95	7	8	7	8	8	8	1	0	1
D-E-F			65	6	7	6	8	8	8	2	1	2
G-H-I			35	5	6	5	8	8	8	3	2	3
A-B-C	50	95	8	8	8	8	8	8	0	0	0	
D-E-F		65	7	7	7	8	8	8	1	1	1	
G-H-I		35	6	6	6	8	8	8	2	2	2	

**Tabla 3.1 (cont.).** Comparativa de presiones resultantes sin y con deflector.

Punto del plano	X (cm)	v (km/h)	Y (mm)	P_{α} (mmH ₂ O)			P_{β} (mmH ₂ O)			$P_{\beta} - P_{\alpha}$ (mmH ₂ O)		
				Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20
A-B-C	1	51,91	95	-2	-3	-2	8	9	8	10	12	10
D-E-F			65	-2	-3	-2	4	6	4	6	9	6
G-H-I			35	-1	-1	-1	2	2	2	3	3	3
A-B-C	5		95	4	5	4	10	11	10	6	6	6
D-E-F			65	2	3	2	7	8	7	5	5	5
G-H-I			35	2	3	2	4	4	4	2	1	2
A-B-C	10		95	7	8	7	12	12	12	5	4	5
D-E-F			65	5	6	5	10	11	10	5	5	5
G-H-I			35	4	6	4	7	8	7	3	2	3
A-B-C	20		95	9	10	9	12	12	12	3	2	3
D-E-F			65	7	8	7	11	12	11	4	4	4
G-H-I			35	6	7	6	11	12	11	5	5	5
A-B-C	30		95	9	10	9	12	12	12	3	2	3
D-E-F			65	8	9	8	12	12	12	4	3	4
G-H-I			35	7	8	7	12	12	12	5	4	5
A-B-C	40		95	10	11	10	12	12	12	2	1	2
D-E-F			65	9	10	9	12	12	12	3	2	3
G-H-I			35	8	8	8	12	12	12	4	4	4
A-B-C	50	95	11	12	11	12	12	12	1	0	1	
D-E-F		65	10	11	10	12	12	12	2	1	2	
G-H-I		35	9	10	9	12	12	12	3	2	3	



Tabla 3.1 (cont.). Comparativa de presiones resultantes sin y con deflector.

Punto del plano	X (cm)	v (km/h)	Y (mm)	P_{α} (mmH ₂ O)			P_{β} (mmH ₂ O)			$P_{\beta} - P_{\alpha}$ (mmH ₂ O)		
				Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20
A-B-C	1	65,44	95	-3	-5	-3	14	15	14	17	20	17
D-E-F			65	-3	-5	-3	7	8	7	10	13	10
G-H-I			35	-3	-5	-3	3	4	3	6	9	6
A-B-C	5		95	6	4	6	15	16	15	9	12	9
D-E-F			65	2	3	2	10	12	10	8	9	8
G-H-I			35	3	3	3	7	9	7	4	6	4
A-B-C	10		95	10	11	10	17	18	17	7	7	7
D-E-F			65	9	10	9	15	18	15	6	8	6
G-H-I			35	8	9	8	11	12	11	3	3	3
A-B-C	20		95	14	15	14	18	19	18	4	4	4
D-E-F			65	12	13	12	16	18	16	4	5	4
G-H-I			35	10	11	10	15	16	15	5	5	5
A-B-C	30		95	15	17	15	18	19	18	3	2	3
D-E-F			65	13	14	13	17	18	17	4	4	4
G-H-I			35	11	13	11	16	18	16	5	5	5
A-B-C	40		95	17	18	17	19	19	19	2	1	2
D-E-F			65	14	15	14	18	19	18	4	4	4
G-H-I			35	13	14	13	17	18	17	4	4	4
A-B-C	50	95	18	19	18	19	19	19	1	0	1	
D-E-F		65	15	17	15	19	19	19	4	2	4	
G-H-I		35	14	15	14	18	19	18	4	4	4	

**Tabla 3.1 (cont.).** Comparativa de presiones resultantes sin y con deflector.

Punto del plano	X (cm)	v (km/h)	Y (mm)	P_{α} (mmH ₂ O)			P_{β} (mmH ₂ O)			$P_{\beta} - P_{\alpha}$ (mmH ₂ O)		
				Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20
A-B-C	1	70,53	95	-4	-4	-4	15	16	15	19	20	19
D-E-F			65	-4	-4	-4	8	9	8	12	13	12
G-H-I			35	-4	-4	-4	3	4	3	7	8	7
A-B-C	5		95	4	5	4	17	18	17	13	13	13
D-E-F			65	4	5	4	10	12	10	6	7	6
G-H-I			35	3	4	3	8	9	8	5	5	5
A-B-C	10		95	9	10	9	19	20	19	10	10	10
D-E-F			65	8	9	8	17	18	17	9	9	9
G-H-I			35	7	8	7	13	14	13	6	6	6
A-B-C	20		95	17	18	17	20	21	20	3	3	3
D-E-F			65	13	14	13	18	19	18	5	5	5
G-H-I			35	11	12	11	17	18	17	6	6	6
A-B-C	30		95	18	19	18	21	22	21	3	3	3
D-E-F			65	16	17	16	19	20	19	3	3	3
G-H-I			35	13	14	13	18	19	18	5	5	5
A-B-C	40		95	19	20	19	22	22	22	3	2	3
D-E-F			65	17	18	17	20	21	20	3	3	3
G-H-I			35	15	16	15	19	20	19	4	4	4
A-B-C	50	95	20	21	20	22	22	22	2	1	2	
D-E-F		65	18	19	18	22	22	22	4	3	4	
G-H-I		35	16	17	16	20	21	20	4	4	4	



Tabla 3.1 (cont.). Comparativa de presiones resultantes sin y con deflector.

Punto del plano	X (cm)	v (km/h)	Y (mm)	P_{α} (mmH ₂ O)			P_{β} (mmH ₂ O)			$P_{\beta} - P_{\alpha}$ (mmH ₂ O)		
				Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20
A-B-C	1	76,41	95	-5	-5	-5	18	19	18	23	24	23
D-E-F			65	-5	-5	-5	8	9	8	13	14	13
G-H-I			35	-4	-5	-4	4	5	4	8	10	8
A-B-C	5		95	5	6	5	19	21	19	14	15	14
D-E-F			65	4	5	4	14	15	14	10	10	10
G-H-I			35	4	5	4	9	10	9	5	5	5
A-B-C	10		95	12	13	12	21	22	21	9	9	9
D-E-F			65	10	11	10	19	20	19	9	9	9
G-H-I			35	9	10	9	15	17	15	6	7	6
A-B-C	20		95	16	17	16	23	24	23	7	7	7
D-E-F			65	16	17	16	21	22	21	5	5	5
G-H-I			35	15	16	15	20	21	20	5	5	5
A-B-C	30		95	19	20	19	24	25	24	5	5	5
D-E-F			65	18	19	18	22	24	22	4	5	4
G-H-I			35	17	18	17	21	22	21	4	4	4
A-B-C	40		95	21	22	21	25	26	25	4	4	4
D-E-F			65	19	20	19	23	24	23	4	4	4
G-H-I			35	18	19	18	22	23	22	4	4	4
A-B-C	50	95	22	23	22	25	26	25	3	3	3	
D-E-F		65	21	22	21	25	26	25	4	4	4	
G-H-I		35	19	20	19	22	23	22	3	3	3	



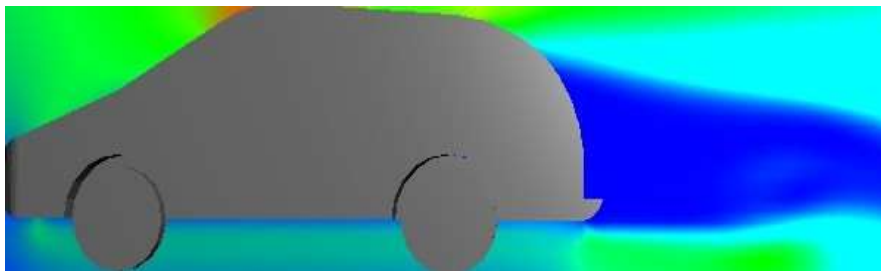
4. DISCUSIÓN

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en cada uno de los dos métodos utilizados. En primer lugar, se comparan los efectos derivados de la simulación computacional y, en segundo lugar, se consideran los resultados de los diversos ensayos empíricos realizados en el túnel de viento.

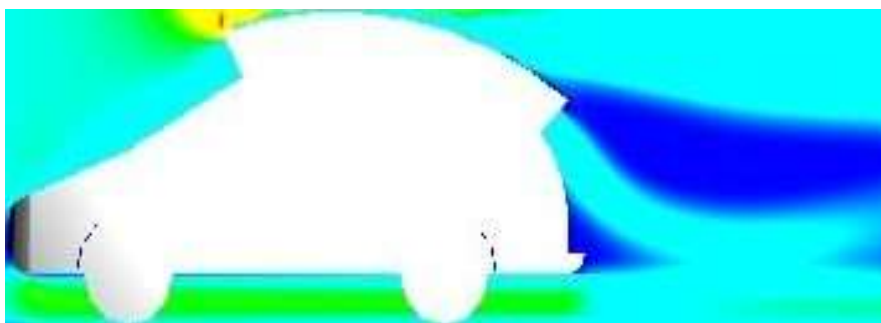
4.1. Análisis simulación computacional

En primer lugar, se verifica mediante el software Autodesk Flow Design® que el sistema de canalización aerodinámico permite que el aire incidente en la parte delantera entre por la cavidad conformada, canalice el aire a lo largo de la longitud entre el techo del vehículo y el deflector y, al mismo tiempo, facilite que el flujo de aire a la salida del deflector se dirija hacia el suelo y a su vez próximo al vehículo, consiguiendo así rellenar con velocidades positivas (Figura 4.1b) la zona de vacío (con velocidad nula de la maqueta convencional sin deflector, Figura 4.1a). Por tanto, se observa que, con el sistema deflector, se aprovecha la fuerza del aire incidente en el vehículo y al trasladarlo a la zona posterior aporta velocidades superiores. Esto se refleja en el nuevo flujo de aire azul claro que aparece en la estela del vehículo (Figura 4.1b), lográndose reducir la resistencia aerodinámica.

Este concepto de aprovechar el aire incidente para trasladarlo a la parte posterior de los vehículos, también se utiliza en la técnica Base Bleed, la cual se basa en introducir conductos canalizadores de aire que atraviesan longitudinalmente todo el vehículo. De modo que diversos estudios [46,105,106] han verificado también mediante CFD su eficacia, sin embargo, la disposición de los conductos, al ubicarse en el interior del vehículo y en su parte inferior, es diferente al planteamiento de esta Tesis. No obstante, el estudio [106] además dispone de una canalización en la parte superior basada en una ranura en el techo y también verifica el efecto.



a)



b)

Figura 4.1. Estela de vehículo: a) sin deflector; b) con deflector.



Asimismo, es necesario indicar que el software utilizado es una versión didáctica destinada a estudiantes, la cual es gratuita y, por tanto, tiene bastantes limitaciones respecto a los programas utilizados por las factorías automovilísticas. Por ejemplo, esta versión apta para la docencia, no está parametrizada para sacar valores negativos, lo que implica que el mínimo valor que es capaz de indicar es el cero. Sin embargo, como es ampliamente sabido, los valores de presión en la zona posterior del coche convencional sin deflector, son siempre negativos y por ello generalmente se denomina zona de vacío. Por tanto, en las Figuras 3.1, 3.2 y 4.1 donde aparecen en la estela valores mínimos de velocidad de 0 m/s es erróneo, ya que realmente tienen valores negativos como se ha observado en los resultados de los ensayos empíricos (Tabla 3.1). Este hecho implica que la ventaja proporcionada por el sistema de canalización es superior a la que se puede observar en la simulación computacional, debido a que la diferencia de magnitud en cada uno de los puntos es mayor a la comparativa mostrada.

A su vez, si se comparan los resultados computacionales con los empíricos, se observa que el aporte de velocidades en la zona de depresión tiene magnitudes superiores en los resultados experimentales, lo que implica que la estela de color azul clara (Figura 4.1b) asociada al redireccionamiento del aire canalizado por la incorporación del deflector, sería gráficamente más grande, teniendo que sustituir casi totalmente a la estela azul oscura inicial (Figura 4.1a) correspondiente al coche convencional.

Por lo tanto, mediante el software de simulación computacional aerodinámico utilizado, se verifica que se cumple el objetivo buscado de rellenar la zona de vacío posterior con velocidades de aire más elevadas al incorporar el sistema de canalización diseñado, pero al no ser un método exacto se decide realizar ensayos empíricos en un túnel de viento.

Por último, indicar que la complejidad de las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento de los fluidos hace prácticamente inviable su resolución completa, con la consecuencia de tener que despreciar diversos fenómenos turbulentos y viscosos, obteniendo por tanto aproximaciones sesgadas a la realidad. Lo cual implica que los métodos de resolución numérica no están aún en posición de poder desplazar a los ensayos aerodinámicos sobre el terreno.

4.2. Análisis ensayos empíricos

Se procede a analizar la totalidad de los resultados obtenidos en los ensayos empíricos (Tabla 3.1) en función de cada uno de los tres ejes de referencia considerados en el sistema de medición según la Figura 2.36. De tal manera que se estudia el comportamiento en cada uno de los ejes (X, Y, Z), respecto de las 6 velocidades examinadas (36, 42, 52, 65, 71 y 76 km/h).

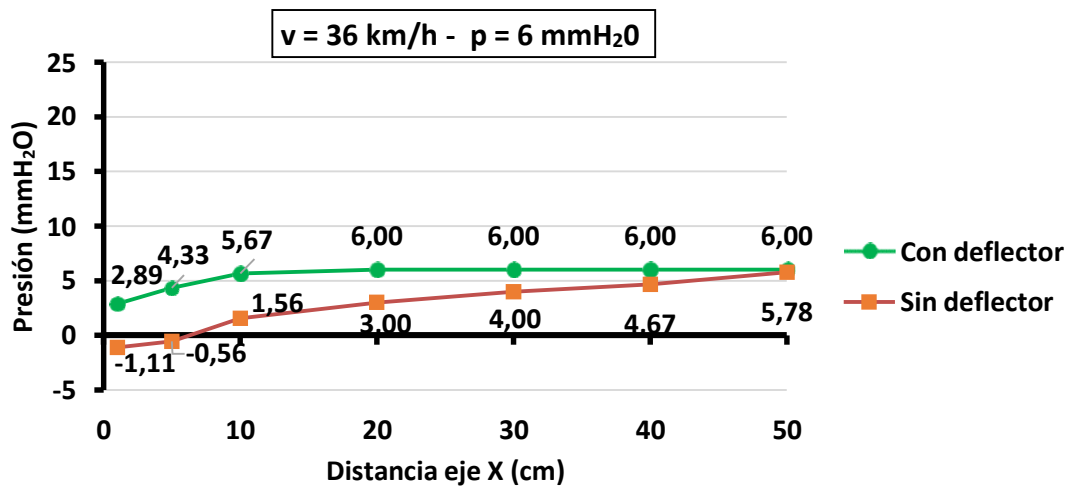
No obstante, cabe mencionar a priori según los resultados de $P_{\beta} - P_{\alpha}$ (Tabla 3.1), que el sistema deflector aporta sobre todo mayor beneficio en los 3 planos iniciales X1, X5 y X10, así como a las velocidades más altas analizadas, al obtenerse valores superiores como diferencia de presiones.



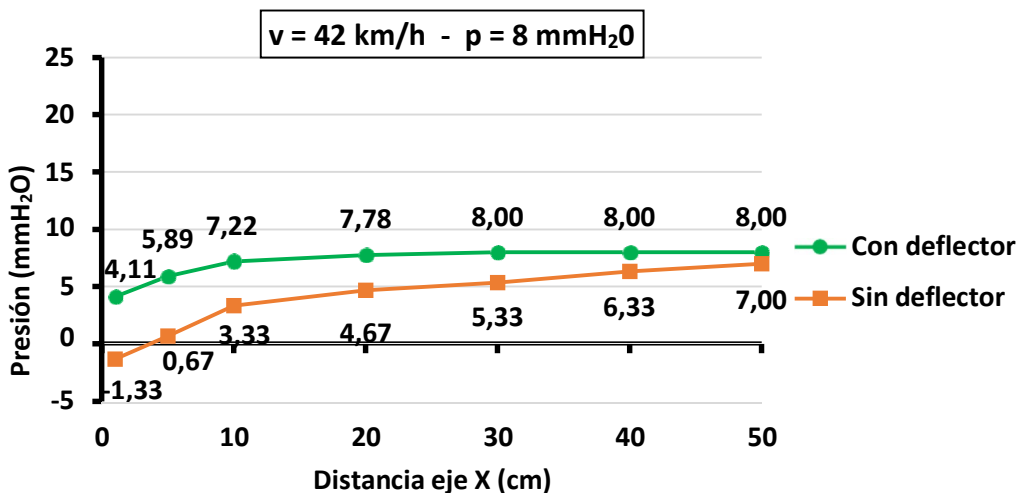
4.2.1. Análisis eje X

Se procede a analizar el comportamiento del aire en la dirección del eje X, es decir, la evolución del comportamiento del flujo de aire a medida que se separa el punto de medición respecto del final del vehículo, es decir, en cada uno de los 7 planos a las distancias X1, X5, X10, X20, X30, X40 y X50. Asimismo, se realizan los ensayos empíricos a cada una de las 6 velocidades consideradas, para valorar su aporte en el comportamiento del flujo de aire.

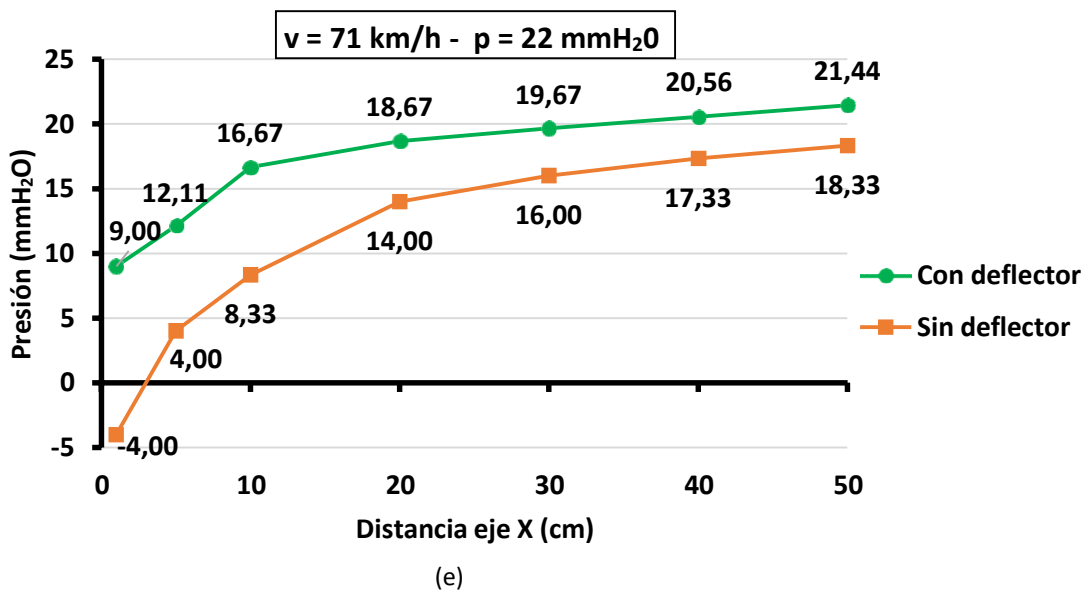
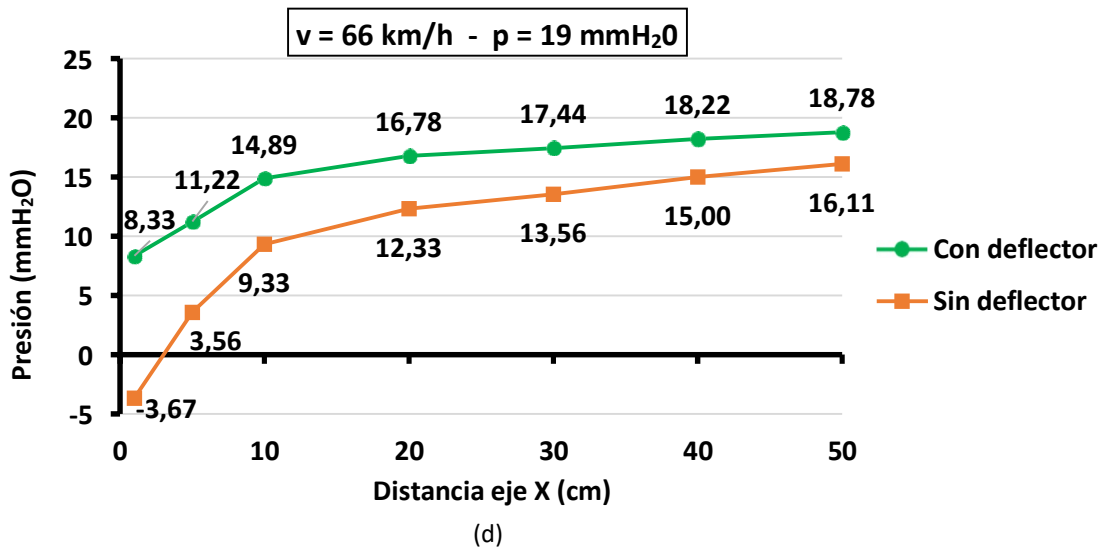
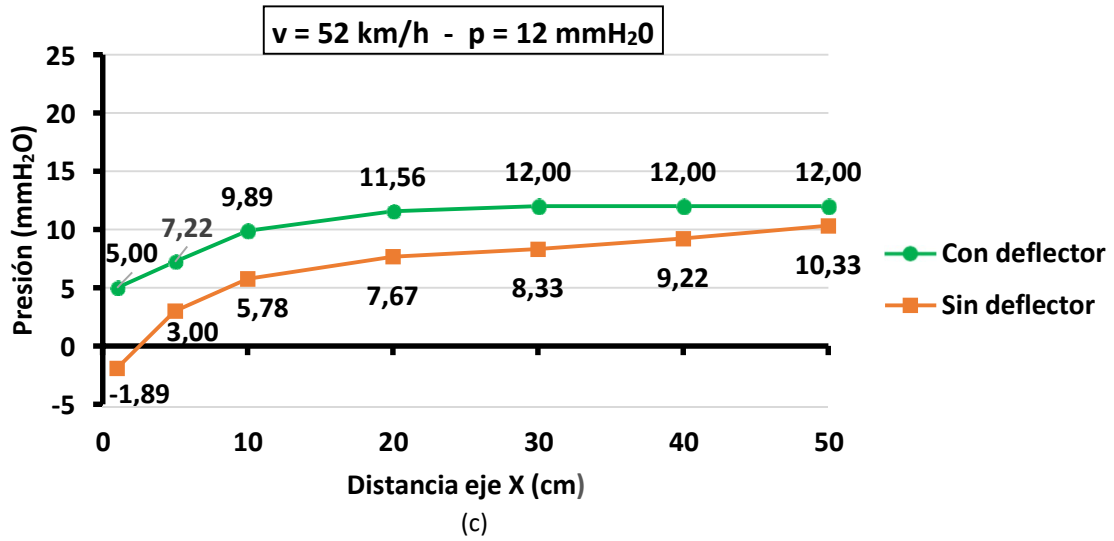
Al comparar las mediciones de las presiones con la velocidad (Figura 4.2), se observa la evolución de los valores de presión sin deflector y con deflector, respecto del eje X (Figura 2.37), es decir, de la distancia de la maqueta a la que se ha medido. A su vez, para conocer la evolución con la velocidad, se analiza a cada una de las 6 velocidades: a 36 km/h (Figura 4.2a), a 42 km/h (Figura 4.2b) y a 52 km/h (Figura 4.2c), a 65 km/h (Figura 4.2d), a 71 km/h (Figura 4.2e) y a 76 km/h (Figura 4.2f). De tal manera que en ordenadas se representan los valores de presión medios de cada uno de los 7 planos (X1, X5, X10, X20, X30, X40 y X50), estando constituido cada plano por 9 medidas de presión (A, B, C, D, E, F, G, H, I).

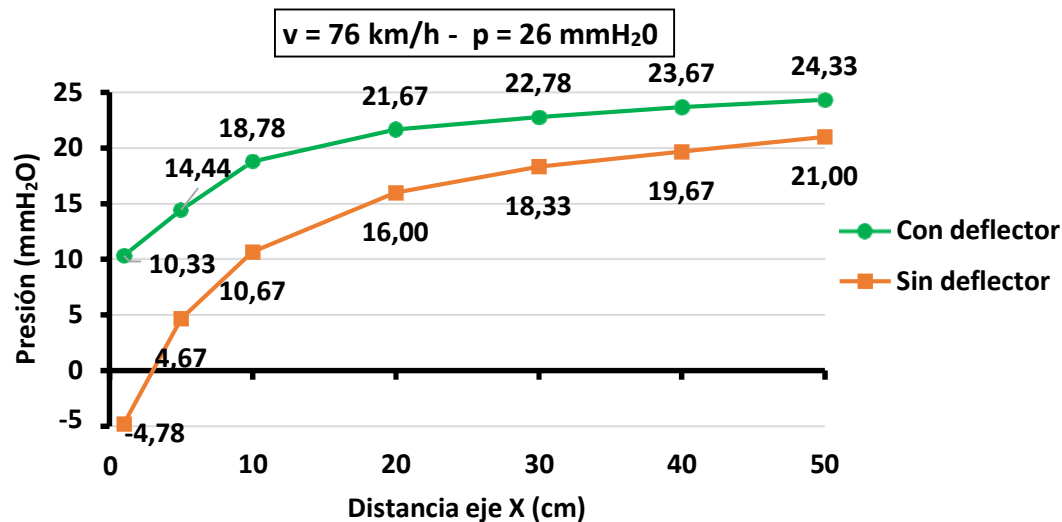


(a)



(b)





(f)

Figura 4.2. Comparativa de presiones con y sin deflector respecto del eje X a distintas velocidades: (a) 36 km/h; (b) 42 km/h; (c) 52 km/h; (d) 65 km/h; (e) 71 km/h y (f) 76 km/h.

Por un lado, se observa que las 6 curvas sin sistema de canalización aerodinámico, comienzan en valores negativos de presión y a medida que se distancia el punto de medición del vehículo van aumentando a valores positivos antes de alcanzar el plano X5, excepto a la velocidad de 36 km/h que lo sobrepasa en pequeña cuantía. De hecho, tomando como referencia el eje de abscisas, a mayor velocidad antes se alcanza el valor nulo y por consiguiente, comienzan los valores positivos. Sin embargo, si se considera como referente el eje de ordenadas, a mayor velocidad implica que se obtienen valores negativos de presión más elevados.

Por otro lado, las series de presión con deflector también tienen tendencia de crecimiento, apreciándose directamente la optimización aportada por el deflector debido a la diferencia de que desde su origen ya constan de valores positivos habiendo desaparecido las presiones negativas que conformaban el efecto de vacío. Asimismo, la totalidad de las curvas con deflector finalizan con valores positivos de mayor magnitud respecto a los medidos sin deflector.

La geometría de las series con y sin deflector de cada una de las 6 gráficas son relativamente similares con un comportamiento con relativo paralelismo, de modo que la distancia entre las respectivas parejas de curvas representa el beneficio en términos de presión que aporta el sistema de canalización aerodinámico diseñado. Asimismo, el factor diferenciador más característico asociado a la evolución del incremento de velocidad, conlleva que a mayor velocidad del flujo de aire, mayor distancia entre las series correspondientes.

Asimismo, en la totalidad de los puntos considerados, las gráficas con el sistema de canalización aerodinámico incorporado alcanzan valores superiores a su respectiva gráfica asociada sin sistema de canalización aerodinámico. La ganancia conseguida por el deflector comparando en términos de velocidad, equivale a la superficie que hay entre la serie con deflector y la serie sin deflector en cada



una de las 6 gráficas de la [Figura 4.2](#). Por tanto, se determina que a mayor velocidad, se consiguen diferencias más elevadas de presión gracias al flujo captado, canalizado y reconducido por el deflector a la zona posterior, lo que implica que la eficiencia del sistema deflector aumenta a medida que se incrementa la velocidad de circulación del vehículo ([Figura 4.3](#)).

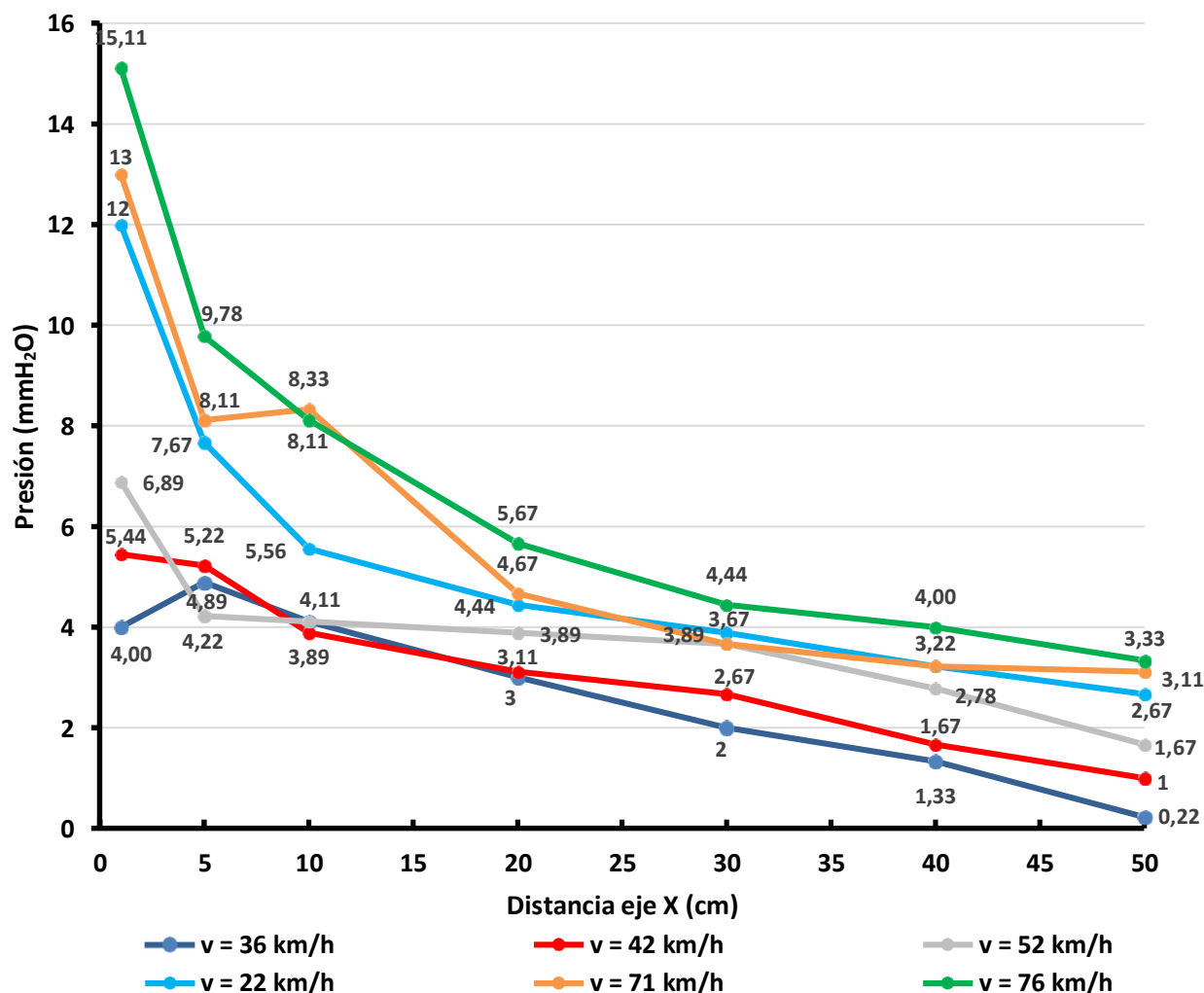


Figura 4.3. Evolución de la diferencia de presión sin y con deflector para cada velocidad.

En la zona de la estela más próxima al final de la maqueta (mediciones realizadas en los planos X1, X5 y X10 según [Figura 2.37](#)) se observa la mayor ganancia al conseguir mayor diferencia entre las presiones medidas sobre la maqueta sin deflector y con deflector, lo que implica una disminución de la resistencia aerodinámica mayor, y a su vez, se observa cómo se atenúan progresivamente las diferencias entre las presiones al distanciarse el punto de medición del final del vehículo, es decir, en los planos X20, X30, X40 y X50, apreciándose una progresión en la inclinación de la curva menos pronunciada.

De este modo, la ventaja de que el deflector continúa recirculando aire sigue existiendo hasta al menos una distancia de 50 cm, que es la última distancia a la que se pueden realizar mediciones por capacidad de espacio en el interior de la cámara de ensayos. A su vez, el efecto de que la magnitud



del flujo de aire recirculado por el deflector, va disminuyendo a medida que se mide a mayor distancia de separación, es coherente con la simulación computacional reflejada en la [Figura 3.1b](#).

Cabe indicar que aunque a nivel general se hable en términos de velocidad en km/h con el objetivo de facilitar la comprensión considerando la velocidad alcanzada por el flujo de aire en el interior de la cámara de ensayos, las gráficas de las [Figuras 4.2, 4.5 y 4.7](#) se establecen en el eje de ordenadas en términos de mmH₂O debido a que aporta mayor exactitud, al ser la medida directa que se realiza mediante el tubo de Pitot con la columna de agua y sobre todo porque así permite discernir el concepto de las mediciones individuales en cada uno de los puntos y planos al expresarse en términos diferentes, en presión en mmH₂O respecto de la velocidad alcanzada por el flujo de aire de manera laminar en el interior de la totalidad de la cámara de ensayos.

En la gráfica de la [Figura 4.2a](#) se observa que sin sistema de canalización aerodinámico, la presión es negativa hasta los 6 cm de distancia aproximadamente del eje X respecto del final del vehículo, iniciando una rampa positiva hasta alcanzar los 6 mmH₂O a los 50 cm de distancia, siendo los 6 mmH₂O equivalentes a la velocidad de 36 km/h, que es la máxima velocidad que puede alcanzar el flujo de aire en el interior de la cámara de ensayos con esta parametrización de proporcionar aire incidente mediante el túnel de viento a una velocidad de 36 km/h.

Además, a nivel global sólo a la velocidad de 35 km/h se puede observar que prácticamente llegan a confluir ambas curvas, la que representa la incorporación del sistema de canalización aerodinámico y la curva con la maqueta sin el sistema de canalización acoplado. Este hecho tiene lugar en el plano X50, no obstante, se visualiza que a medida que se incrementa la velocidad, aumenta la distancia entre las respectivas curvas con y sin deflector, lo que conlleva a obtener una mayor ventaja competitiva aportada por el deflector. A su vez, implica que la distancia entre los puntos de las curvas con y sin deflector tomando como referente el plano X50, sea cada vez superior, reflejándose dichas distancias en la [Tabla 4.1](#).

Tabla 4.1. Distancia entre las curvas con y sin deflector en el plano X50.

Velocidad (km/h)	Distancia entre curvas en X50 (mmH ₂ O)
36	0,22
42	1,00
52	1,67
65	2,67
71	3,11
76	3,33

Asimismo, en la [Figura 4.4](#) se muestra gráficamente la evolución de la distancia de separación entre la curva que representa la incorporación del deflector a la maqueta y la curva sin deflector, para cada



una de las 6 velocidades estudiadas y todas ellas consideradas en el plano de X50 ya que es el último plano en el que se pueden medir las presiones con el tubo de Pitot y permite observar a la mayor distancia respecto del vehículo el efecto de incorporar el sistema deflector. En la gráfica se detecta que a mayor velocidad existe mayor valor de presión en cada punto medido, lo que implica mayor aportación del flujo de aire reconducido por el sistema de canalización aerodinámico.

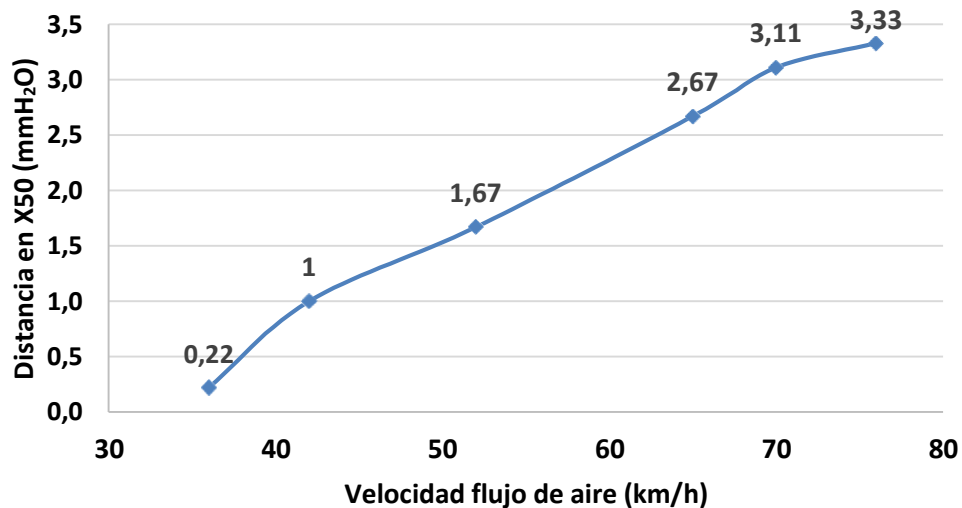
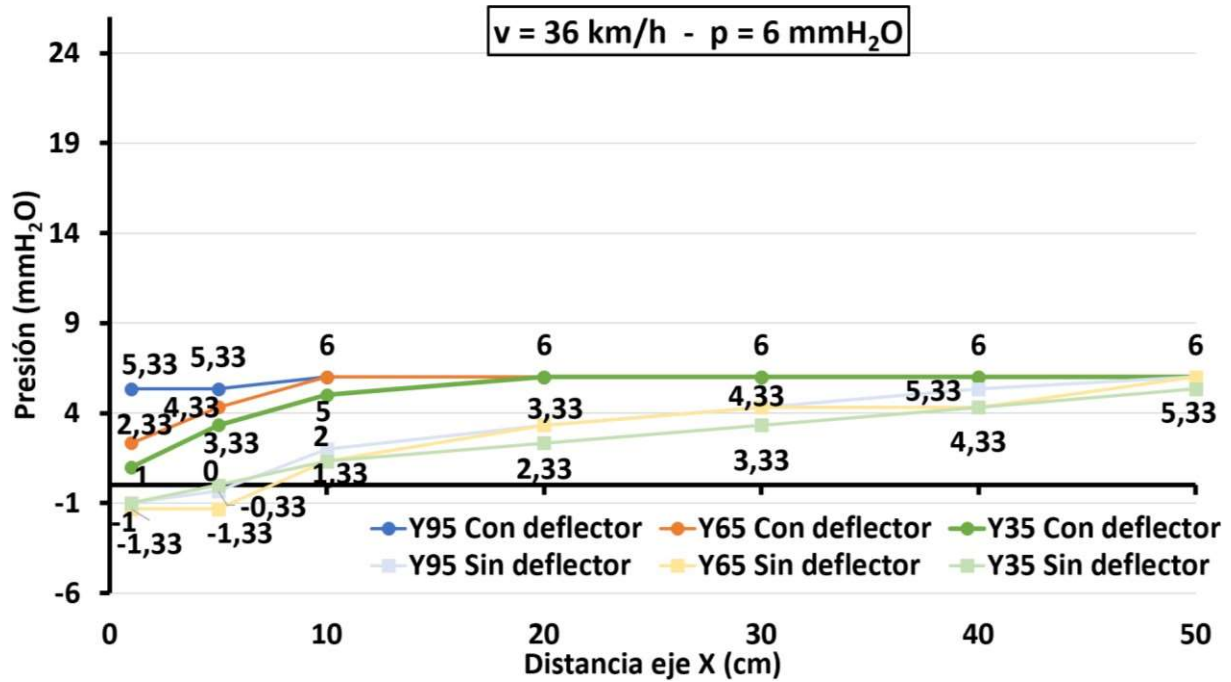


Figura 4.4. Distancia entre las curvas con y sin deflector en X50.

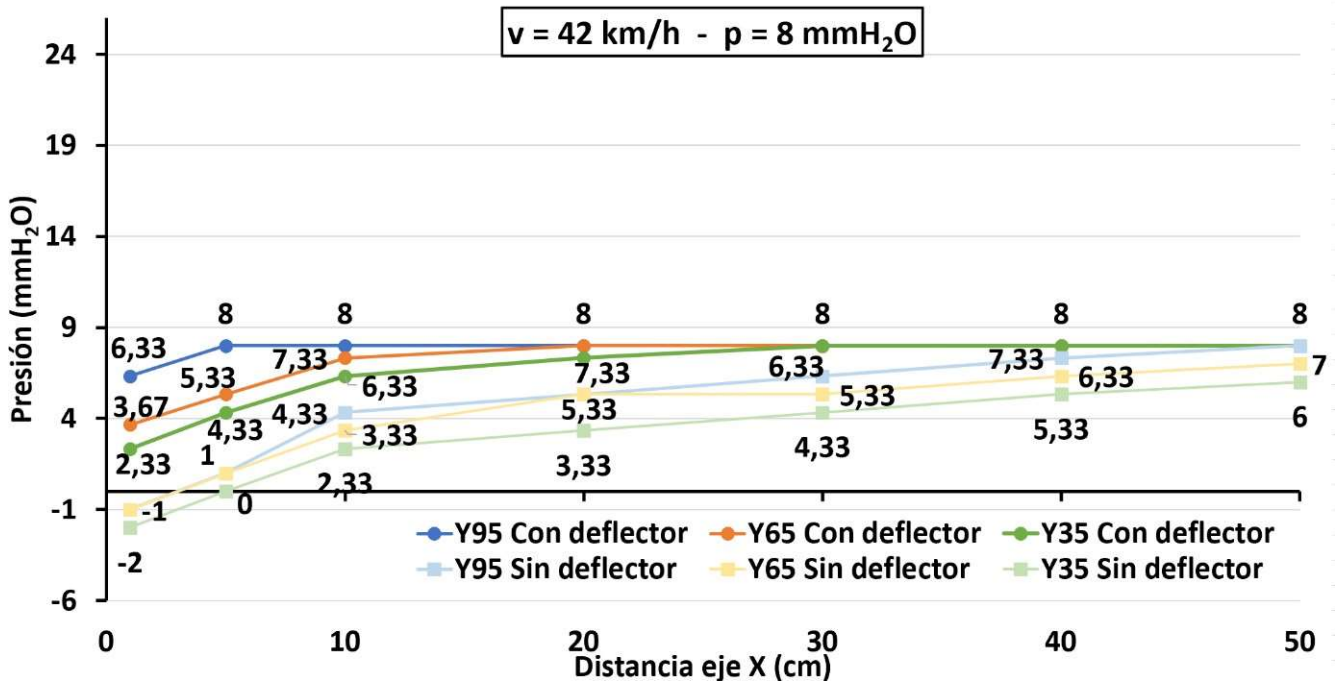
Por último, cabe indicar que en las velocidades de 36, 42 y 52 km/h se visualiza el punto en el que la aportación del sistema de canalización aerodinámico alcanza la estabilidad al apreciarse en las respectivas curvas con el deflector incorporado la repetición de los mismos valores de presión, de tal manera que a la velocidad de 36 km/h se alcanza la homogeneidad de 6 mmH₂O a partir del plano X20, cuyo resultado es coherente al ser equivalentes los 36 km/h con los 6 mmH₂O. Por otro lado, a la velocidad de 42 km/h se estabiliza a partir del plano X30 y a la velocidad de 52 km/h también a partir del plano X30.

4.2.2. Análisis eje Y

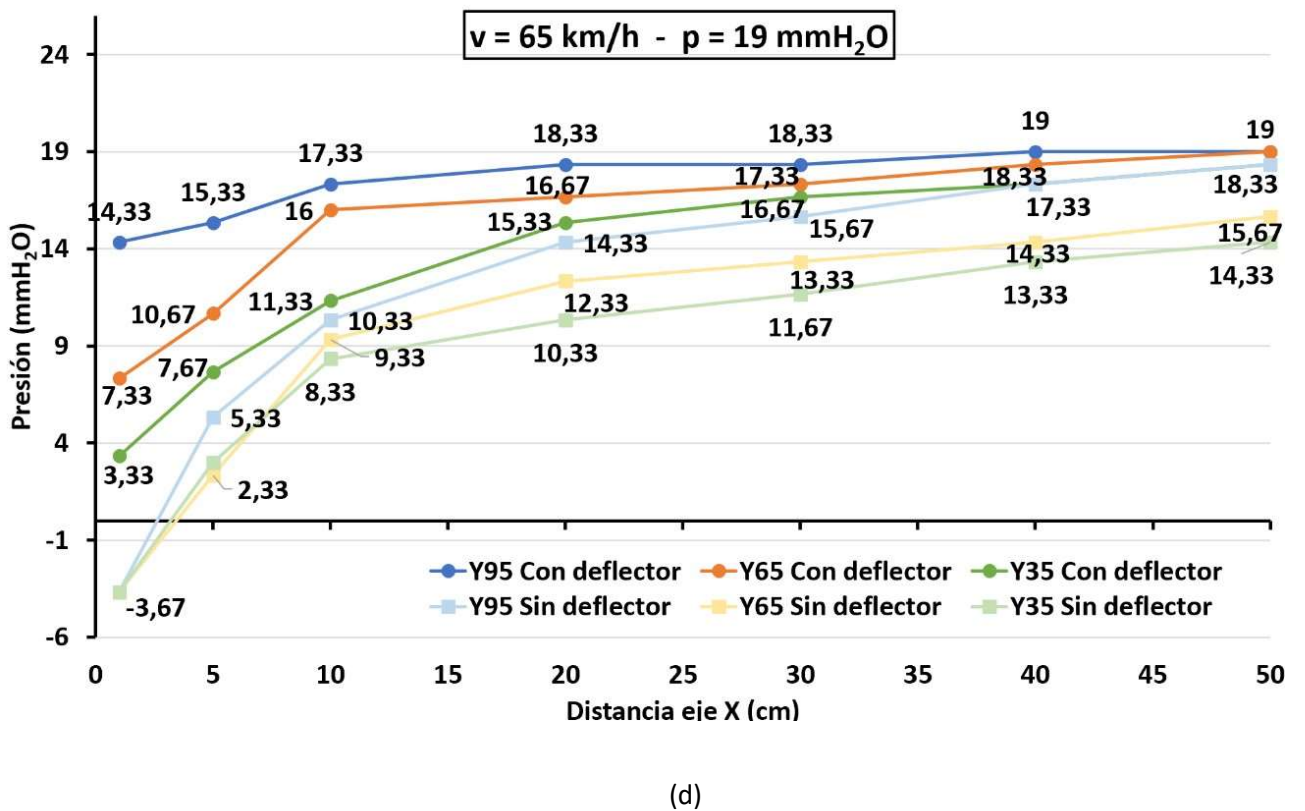
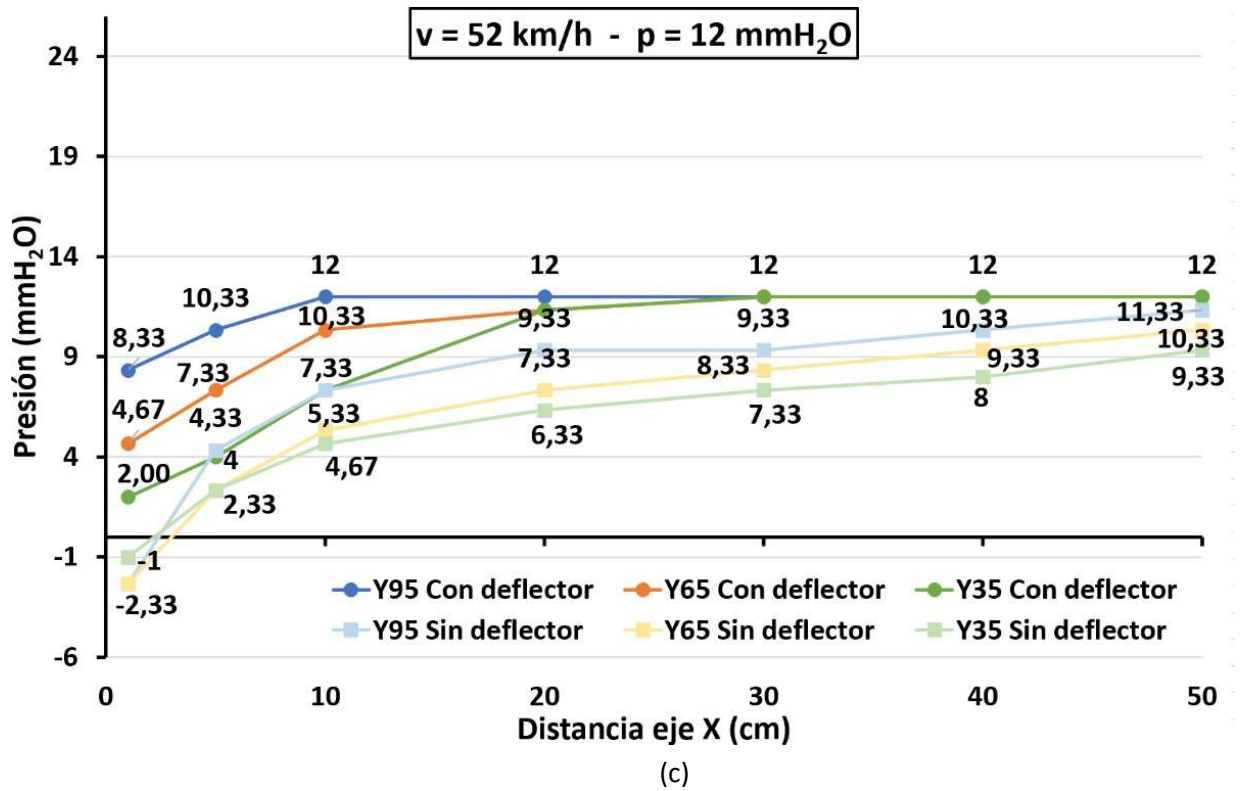
Seguidamente se examinan los valores obtenidos de las presiones mediante la columna de agua respecto del eje Y de los puntos de medición referenciados a la [Figura 2.36](#), de modo que en la [Figura 4.5](#) se representan las 6 velocidades consideradas, de tal manera que la velocidad de 36 km/h se refleja en la [Figura 4.5a](#)), 42 km/h ([Figura 4.5b](#)), 52 km/h ([Figura 4.5c](#)), 65 km/h ([Figura 4.5d](#)), 71 km/h ([Figura 4.5e](#)) y 76 km/h ([Figura 4.5f](#)).

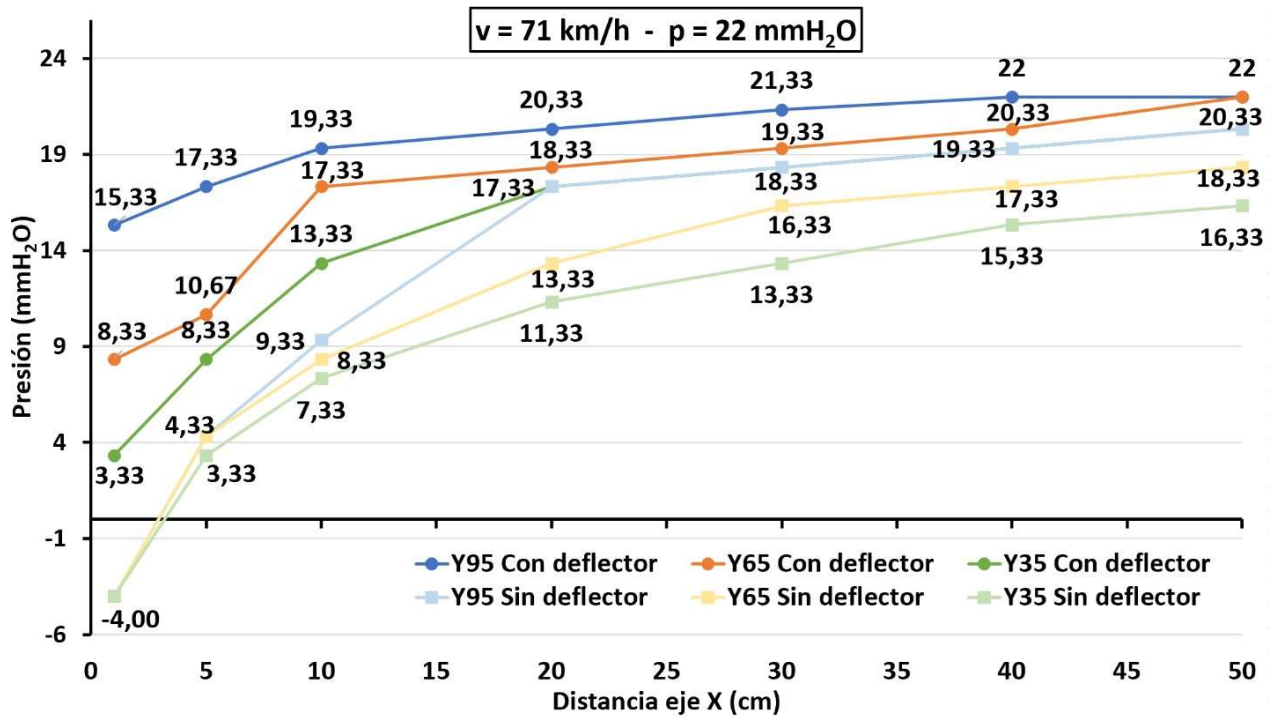


(a)

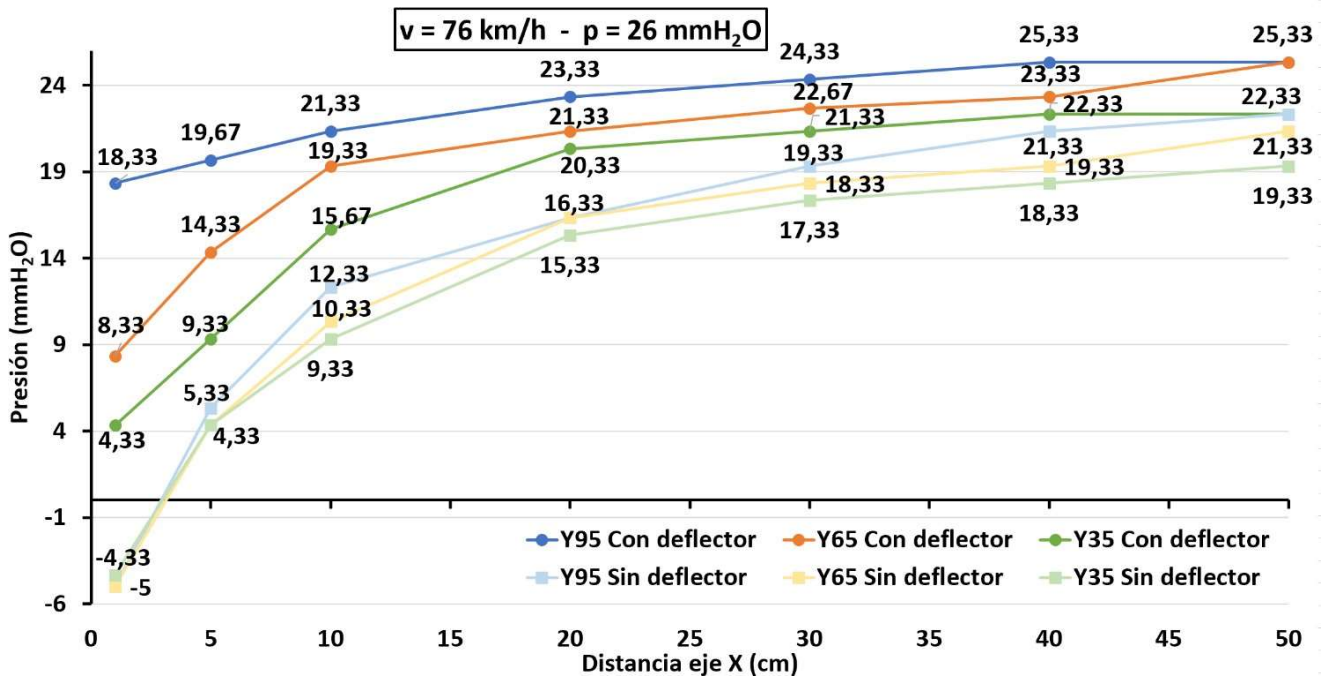


(b)





(e)



(f)

Figura 4.5. Comparativa de presiones con y sin deflector respecto del eje Y a distintas velocidades: a) 36 km/h; b) 42 km/h; c) 52 km/h; d) 65 km/h; e) 71 km/h y f) 76 km/h.



En primer lugar, a nivel global se comprueba que en la totalidad de las 6 gráficas, las 3 curvas asociadas a las 3 coordenadas del eje Y (Y35, Y65 e Y95) con el sistema de canalización aerodinámico incorporado, alcanzan valores superiores en todos los puntos respecto de las 3 curvas asociadas a la maqueta convencional sin la incorporación del sistema. Es decir, que se observa la ventaja del aire que se logra reconducir al comparar las 2 curvas asociadas a cada coordenada del eje Y con y sin deflector, e incluso también al comparar cualquiera de las 3 curvas con deflector con cualquiera de las 3 curvas sin deflector, sin necesidad de las respectivas parejas, lo que significa que en todos los puntos se genera un beneficio al conseguirse presiones superiores o al menos iguales, implicando que el flujo de aire logra reconducirse por el interior de la cavidad constituida por el deflector de manera que consigue rellenar la zona posterior de los vehículos con presiones superiores y, por consiguiente, se disminuye la resistencia aerodinámica.

Se aprecia que las 3 series correspondientes a las 3 coordenadas sin deflector siguen trayectorias relativamente similares sobre todo en las dos velocidades iniciales de 37 km/h y 42 km/h y a su vez en la velocidad de 76 km/h. Sin embargo, al considerar el deflector incorporado a la maqueta, la coordenada Y95 es significativamente superior a las otras 2 coordenadas inferiores Y65 e Y35, lo que implica que en la altura de Y95 se logran alcanzar los mayores aportes de presión proporcionados por el aire canalizado por el deflector. Este efecto se debe a que esa altura Y95 es la zona donde llega el flujo de aire canalizado por el deflector con mayor velocidad y presión, de tal manera que en las coordenadas inferiores Y65 e Y35 se percibe que el flujo de aire aportado va perdiendo potencial al irse disipando.

Asimismo, se visualiza en las 6 gráficas que las 3 curvas sin deflector comienzan con presiones negativas, mientras que las 3 curvas con el deflector incorporado empiezan ya directamente con valores de presiones positivos, lo cual es muy beneficioso al conseguirse eliminar todo el vacío. Además, al obtener presiones positivas se logra el efecto contrario, ya que se transforma la resistencia aerodinámica originada en una fuerza de impulsión de la maqueta en el mismo sentido que el de circulación de los automóviles.

Por otro lado, se analiza la duración del efecto del aire reconducido por el sistema de canalización aerodinámico, de modo que a la primera velocidad de 36 km/h se aprecia que llegan a unificarse las 2 curvas asociadas a la coordenada de Y95, la curva con deflector y la curva sin deflector en el plano X50, y de igual manera sucede con las 2 curvas asociadas a la coordenada Y65. Sin embargo, en la coordenada Y35 la curva sin deflector queda distanciada 0,67 mmH₂O respecto de la presión de 6 mmH₂O a llegar a alcanzar.

De esta manera, sólo en la primera y segunda velocidad (36 y 42 km/h) se ve la unificación de las curvas parejas asociadas con deflector y sin él en la coordenada Y95, mientras que únicamente a la velocidad de 36 km/h se aprecia la unificación de Y65 según se aprecia en la (Figura 4.6), similar a lo que sucedía en el eje X ya que solo se unificaba en la velocidad de 36 km/h.

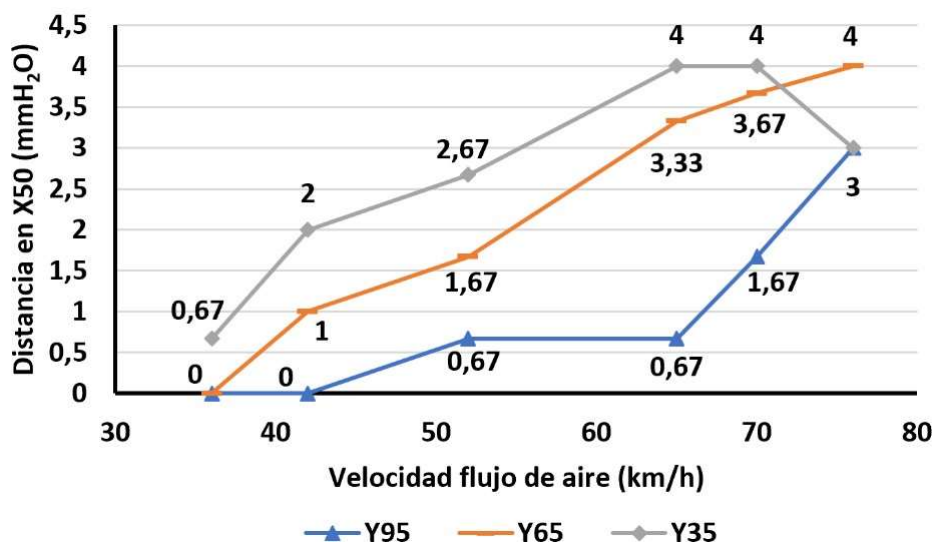


Figura 4.6. Distancia entre las curvas con y sin deflector de cada coordenada del eje Y en el plano X50.

En las siguientes velocidades de 52, 66, 71 y 76 km/h, se mantiene la tendencia de que las 2 respectivas curvas asociadas a la coordenada Y95 son las que más se aproximan entre sí en el último plano de medición X50. A continuación, se aproximan más las curvas de la coordenada de Y65 y, por último, las curvas de Y35, lo que significa que se consigue la unificación antes en la altura correspondiente a la coordenada más alta y va descendiendo progresivamente en orden secuencial.

Por el contrario, cabe indicar que en los planos iniciales de X1, X5 y X10 en la coordenada Y95 se produce el efecto contrario, ya que las curvas respectivas con y sin deflector son las que se posicionan más distantes entre sí, siguiéndolas las curvas de la coordenada Y65 y posteriormente la coordenada Y35. Este hecho se debe a que al estar posicionada la coordenada Y95 en un plano paralelo al suelo más alto respecto de Y65 e Y35, recibe antes el aire reconducido y con más fuerza, lo que a su vez deriva en que antes deje de percibirse el efecto del flujo de aire canalizado.

4.2.3. Análisis eje Z

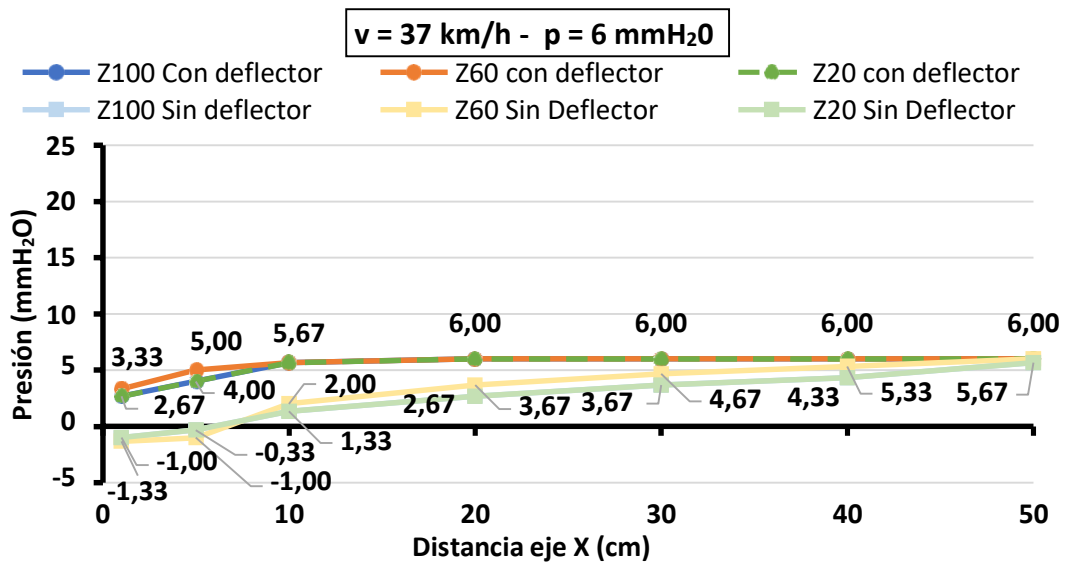
Al analizar los valores de las presiones de las curvas asociadas a las coordenadas Z20 y Z100 se solapan en la totalidad de los tramos de las 6 gráficas de la [Figura 4.7](#) correspondiéndose cada una de ellas a una velocidad distinta, lo que implica que el comportamiento del aire en estas 2 coordenadas es simétrico respecto de Z60 que tiene en todas las ocasiones valores superiores tanto en valores positivos como en negativos o al menos iguales, y a su vez se observa también tanto con deflector como sin deflector. De tal manera que este efecto es coherente con el hecho de que Z20 y Z100 se corresponde con los laterales del vehículo, de modo que en la coordenada central Z60 se acumula la presión aportada por ambos laterales permitiendo alcanzar valores superiores.

Además, en las coordenadas Z20 y Z100 no se aprovecha toda la fuerza del aire porque se dispersa al estar situadas próximas del final del volumen ocupado por el vehículo. Asimismo, se detecta que a medida que se incrementa la velocidad suministrada por el túnel de viento, la diferencia entre las coordenadas Z20 y Z100 respecto de Z60 se incrementa progresivamente.

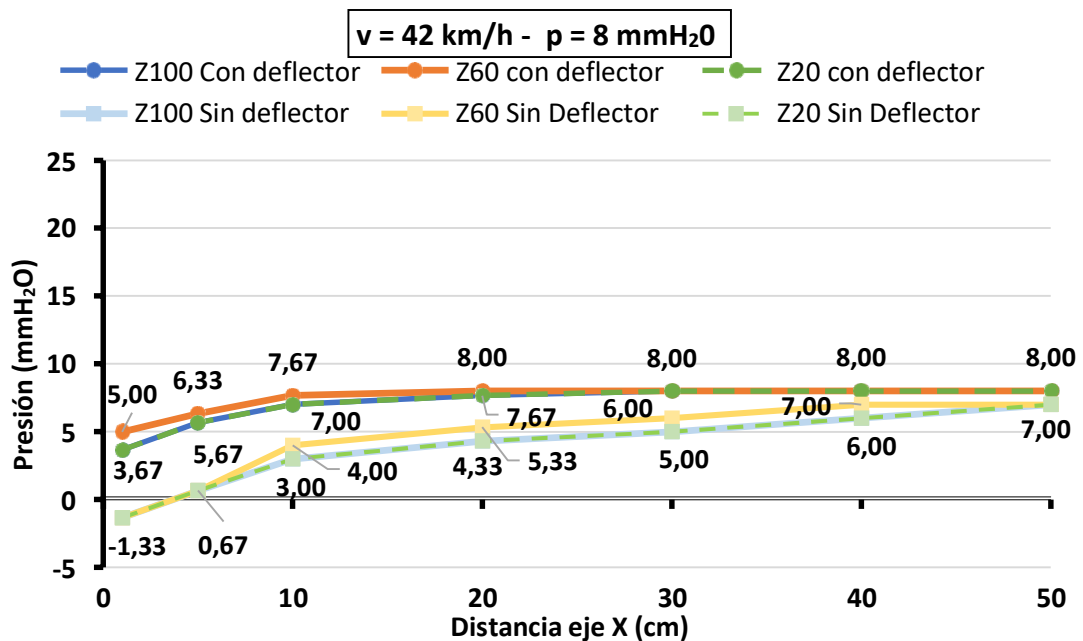


Por otro lado, cabe destacar que las 3 curvas correspondientes a los ensayos sin el sistema de canalización aerodinámica comienzan en valores negativos para la totalidad de las 6 velocidades analizadas. Asimismo, la evolución se desarrolla de manera que a las velocidades más bajas la magnitud negativa es de menor valor, pero se mantiene a mayor distancia respecto del eje X. No obstante, el hecho de que aumente la velocidad conlleva que las presiones alcanzadas en el plano X1 adquieren valores superiores.

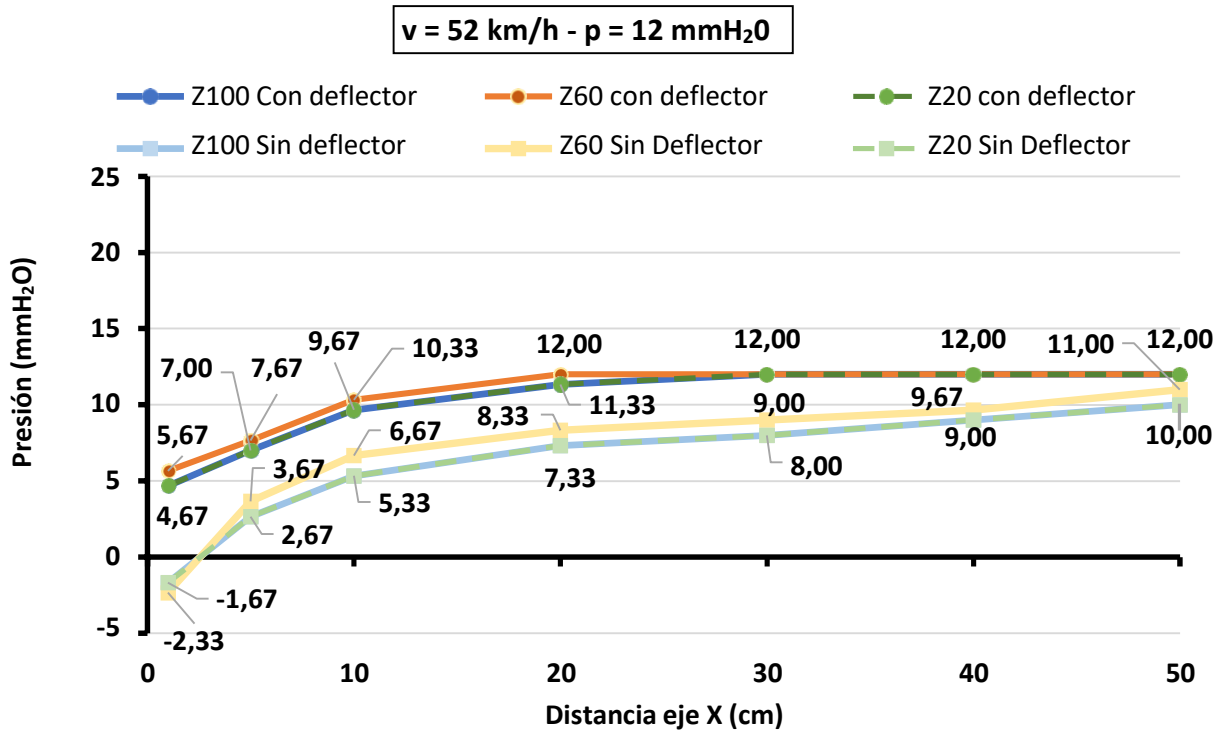
La pendiente de crecimiento es superior en los 3 planos iniciales X1, X5 y X10 debido a que es la zona donde se unen los flujos laterales con el central y la variación de la trayectoria es debida a la diferencia de presiones que tienden a igualarse en sus distintos planos de la estela originada por el principio de los fluidos.



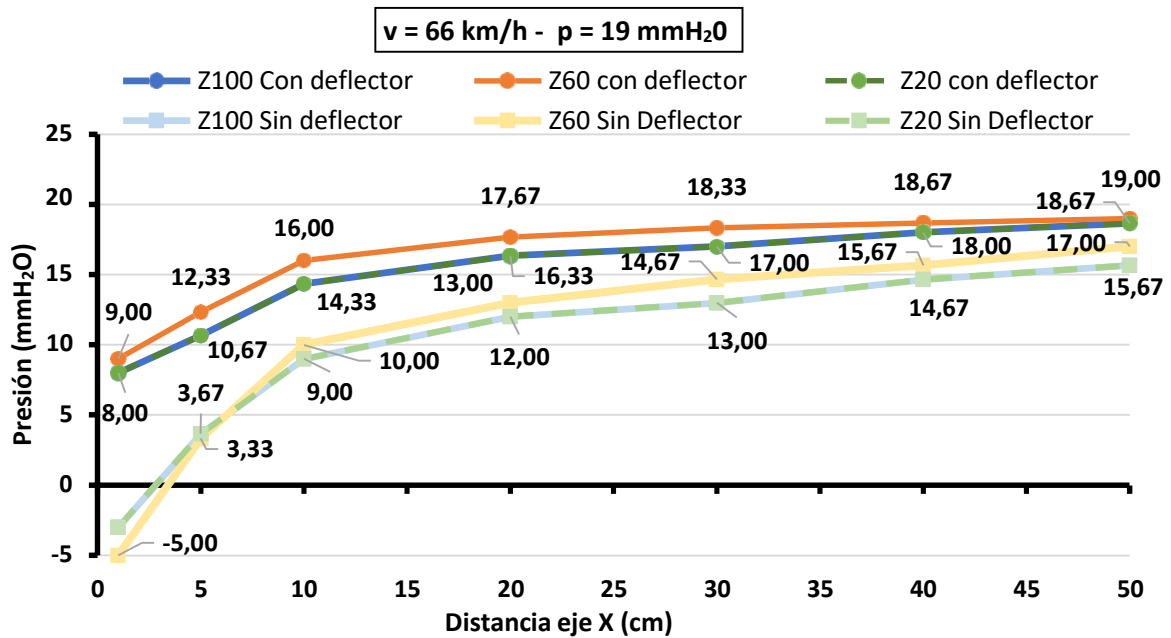
(a)



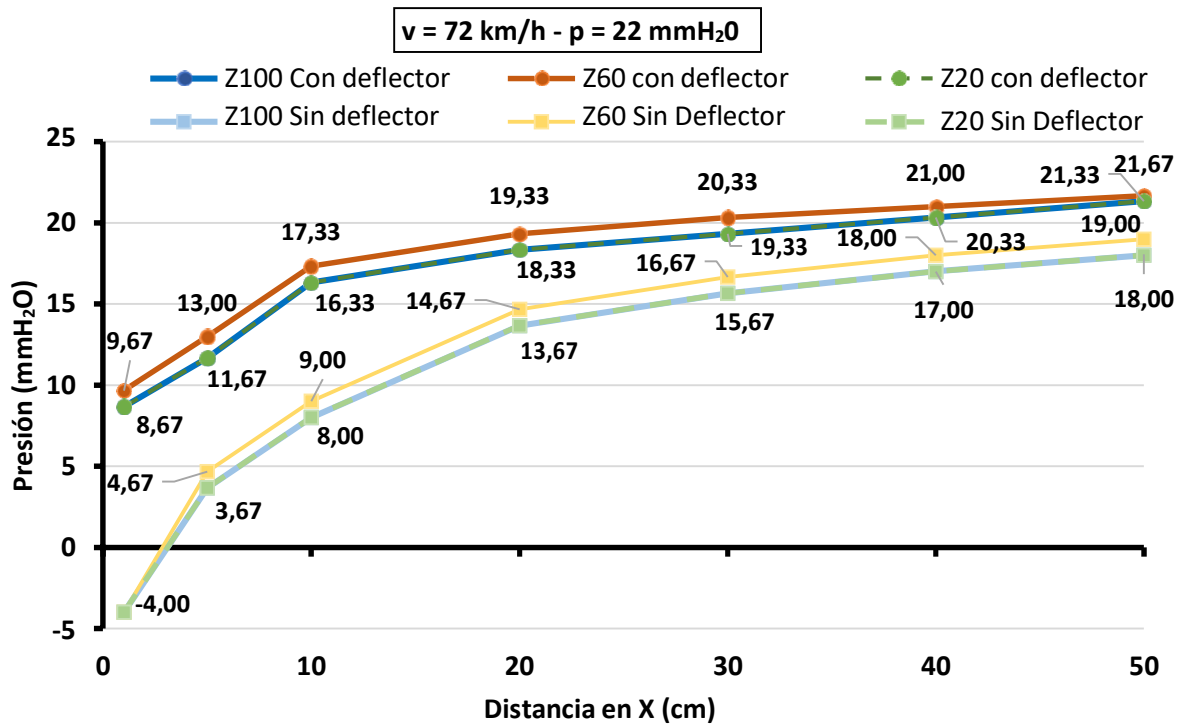
(b)



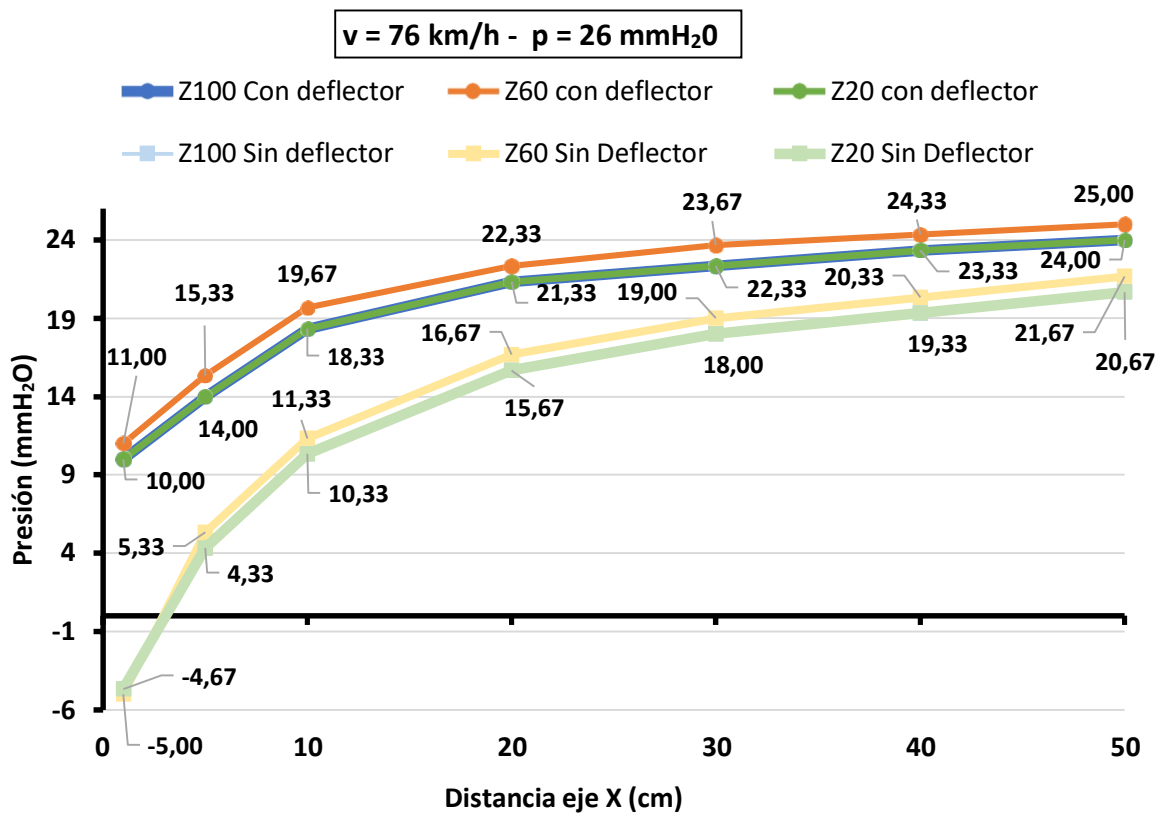
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.7. Comparativa de presiones con y sin deflector respecto del eje Z a distintas velocidades: a) 36 km/h; b) 42 km/h; c) 52 km/h; d) 65 km/h; e) 71 km/h y f) 76 km/h.



Por último, cabe indicar que la maqueta con la que se realizan los ensayos empíricos en la presente Tesis, consta de una forma muy aerodinámica al estar muy redondeada la parte posterior en su parte superior, lo que favorece la aerodinámica de la maqueta tanto con deflector como sin deflector, lo que implica suponer que la comparativa al incorporar el sistema deflector sea de menor magnitud y por consiguiente, aporta resultados muy conservadores.

4.3. Cálculo del rendimiento del deflector

En este apartado se va a proceder a estimar el rendimiento que proporciona el sistema de canalización aerodinámico, de tal manera que se va a hallar el valor correspondiente a cada una de las seis velocidades analizadas (36, 42, 52, 65, 71 y 76 km/h), lo que a su vez permitirá posteriormente analizar la evolución del rendimiento respecto de la velocidad.

El procedimiento para calcular el rendimiento se fundamenta en el balance de fuerzas influyentes, de modo que se realiza de manera separada el balance energético del vehículo sin deflector y por otro lado, del vehículo con deflector, con la finalidad de poder comparar ambos balances energéticos cuantitativamente, lo que a su vez ayuda a determinar finalmente el cálculo del rendimiento obtenido con la incorporación del sistema deflector a un vehículo.

Las fuerzas consideradas que intervienen en el movimiento del vehículo son: (i) la resistencia a la rodadura F_R ; (ii) la resistencia aerodinámica F_A ; (iii) la resistencia de pendiente F_p y (iv) la fuerza de empuje F_E ; las cuales se explican y calculan seguidamente de manera independiente.

- (i) En primer lugar, se calcula la resistencia a la rodadura F_R [107] la cual se produce por el desplazamiento del vehículo, oponiéndose a la fuerza de empuje y su valor depende de la masa del vehículo, de la geometría de dirección, del tipo, perfil y presión de inflado de los neumáticos, de la velocidad de marcha, estado de la carretera y de la superficie de la misma. Se calcula multiplicando el peso del vehículo por el coeficiente de resistencia a la rodadura k según la siguiente ecuación (1):

$$F_R = k \cdot N = k \cdot m \cdot g \quad (1)$$

donde:

k : coeficiente de resistencia a la rodadura [108] (coeficiente de rozamiento dinámico), cuyo valor depende del material y de los factores ambientales (Tabla 4.2).

Se ha considerado para los cálculos $k = 0,03$ [109] debido a que es el valor medio para una carretera en buen estado, lo que se justifica en que posteriormente cuando se explique la fuerza de pendiente, se indicará que se considera desplazamiento en llano.

Tabla 4.2. Coeficiente de resistencia a la rodadura.

Naturaleza y estado del suelo	Coeficiente de resistencia a la rodadura (k)
Carretera en buen estado	0,02 a 0,04
Camino de tierra afirmado	0,03 a 0,05
Camino de tierra	0,04 a 0,06



N : fuerza ejercida por el vehículo contra la superficie con la que entra en contacto, la cual se mide en Newton (N).

m : masa del vehículo a escala, siendo la escala 1:12. Hay que tener en cuenta que la maqueta sin el deflector tiene una masa de 0,99 kg, mientras que el deflector considerándolo como elemento individual tiene una masa de 0,12 kg, lo que implica que la masa total de la maqueta cuando se la incorpora el deflector es de 1,11 kg.

g : aceleración de la gravedad 9,8 m/s^2 .

A continuación, se calcula por un lado la fuerza de rodadura sin el deflector $F_{R(\alpha)}$ según la ecuación (2):

$$F_{R(\alpha)} = k \cdot m \cdot g = 0,03 \cdot 0,99 \text{ (kg)} \cdot 9,8 \text{ (m/s}^2\text{)} = 0,2911 \text{ (N)} \quad (2)$$

Y por otro lado, se halla la fuerza de rodadura considerando que se ha incorporado el deflector a la maqueta acorde a la ecuación (3):

$$F_{R(\beta)} = k \cdot m \cdot g = 0,03 \cdot (0,99 + 0,12) \text{ (kg)} \cdot 9,8 \text{ (m/s}^2\text{)} = 0,3263 \text{ (N)} \quad (3)$$

De los dos resultados (2) y (3) se obtiene que la fuerza de rodadura cuando se incorpora el sistema deflector es superior a la fuerza de rodadura de la maqueta convencional, sin el deflector, lo cual era previsible debido a que la fuerza de rodadura depende de manera directamente proporcional del peso y el deflector supone un incremento del mismo.

- (ii) En segundo lugar, se calcula la resistencia aerodinámica F_A que se opone al avance del vehículo, la cual depende de la forma y tamaño del automóvil, de la dirección y fuerza del flujo de aire incidente, de la densidad del aire y a su vez depende de la velocidad de circulación según la ecuación (4).

$$F_A = (1/2) \cdot C_x \cdot S \cdot \rho \cdot v^2 \quad (4)$$

donde:

C_x : representa el coeficiente de resistencia aerodinámica, considerándose el valor dado por el fabricante para un modelo de carrocería similar, de modo que $C_x = 0,32$. Asimismo, indicar que la mayoría de automóviles tienen un coeficiente de resistencia aerodinámica entre 0,3 y 0,35.

S : superficie frontal del vehículo afectada, de modo que es necesario considerar las dos circunstancias de manera individual.

Por un lado, la superficie delantera de la maqueta sin el sistema deflector S_α considerando la longitud y altura según la ecuación (5):

$$S_\alpha = 0,115 \text{ m} \cdot 0,124 \text{ m} = 0,01426 \text{ m}^2 \quad (5)$$

Por otro lado, se calcula la superficie frontal respecto del conjunto formado por la maqueta y el deflector incorporado, que se rige por la ecuación (6):



$$S_{\beta} = S_{\alpha} + 0,004 \text{ m} \cdot 0,16 \text{ m} = 0,0149 \text{ m}^2 \quad (6)$$

ρ : densidade do aire (Kg/m^3), a $1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$ segundo ISA (International Standard Atmosphere) a nivel do mar e a $15 \text{ }^\circ\text{C}$, pero que a su vez se pode expresar a través da relación (7):

$$\rho = \frac{P_{atm}}{R \cdot T} \quad (7)$$

onde:

R : Constante de gas (aire): $287,05$.

T : Temperatura en kelvin (K).

P_{atm} : presión atmosférica (101.325 Pa a nivel do mar), que a su vez podemos expresar en función da altura a seguinte ecuación (8):

$$P(\text{Pa}) = 101.325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot H)^{5,2559} \quad (8)$$

onde:

H : altura sobre o nivel do mar (m).

v : velocidade do vehículo en circulación, non obstante, como os vehículos en os ensaios empíricos en os túneles aerodinámicos permanecen en estado estacionario, a velocidade que se toma como valor de referencia é a velocidade do fluxo de aire que suministra o túnel aerodinámico na cámara de ensaios e, por tanto, a velocidade do aire con a que incide sobre a maqueta.

Debido a que se han repetido a totalidade das medicións a seis velocidades diferentes, se va a proceder a realizar os cálculos regidos por a ecuación (4) con o valor concreto de cada una das velocidades.

Por tanto, para a adecuada correlación e identificación de cada una das seis velocidades, en primeiro lugar, en a [Tabla 4.3](#) se mostra una correlación da variable velocidade (columna da esquerda), de modo que mediante un subíndice se asocia con o correspondente valor da velocidade en km/h (columna central [Tabla 4.3](#)), debido a que a lo largo da presente Tesis a velocidade do fluxo de aire proporcionado por o túnel aerodinámico se indica en unidades de km/h e así manter un mesmo criterio.

Non obstante, o valor que se introduce en a ecuación (4) é o equivalente en as unidades de m/s (columna derecha [Tabla 4.3](#)) ya que se fundamenta en as unidades do SI (Sistema Internacional de Unidades).



Tabla 4.3. Correlación de la denominación de la velocidad con su magnitud.

Variable velocidad asociada	Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)
v_{36}	36,44	10,18
v_{42}	42,31	11,75
v_{52}	51,91	14,42
v_{64}	65,44	18,21
v_{70}	70,53	19,59
v_{75}	76,41	21,23

Seguidamente se procede a calcular la resistencia aerodinámica al conocer todos los factores que influyen en ella según la ecuación (4) y se efectúa para cada una de las 6 velocidades en km/h (columna central [Tabla 4.3](#)). No obstante, tal y como ya se ha definido el factor de superficie, se desglosa en 2 componentes, superficie frontal de la maqueta sin el deflector S_{α} y superficie frontal de la maqueta con el deflector S_{β} , por lo que la ecuación (4) pasa a su vez a constar de las siguientes 2 ecuaciones asociadas:

$$F_{A(\alpha)} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S_{\alpha} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (9)$$

$$F_{A(\beta)} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S_{\beta} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (10)$$

1. Fuerza de resistencia aerodinámica a 36 km/h y 12°C:

1.1. Vehículo sin deflector $F_{A(\alpha)}$:

$$F_{A(\alpha)(36)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot 0,01426 \text{ (m}^2\text{)} \cdot 1,1358 \text{ (kg/m}^3\text{)} \cdot 10,18^2 \text{ (m/s)}^2 = 0,2685 \text{ N} \quad (11)$$

1.2. Vehículo con deflector $F_{A(\beta)}$:

$$F_{A(\beta)(36)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot 0,0149 \text{ (m}^2\text{)} \cdot 1,1358 \text{ (kg/m}^3\text{)} \cdot 10,18^2 \text{ (m/s)}^2 = 0,2805 \text{ N} \quad (12)$$

2. Fuerza de resistencia aerodinámica a 42 km/h y 12°C:

2.1. Vehículo sin deflector $F_{A(\alpha)}$:

$$F_{A(\alpha)(42)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot 0,01426 \text{ (m}^2\text{)} \cdot 1,1358 \text{ (kg/m}^3\text{)} \cdot 11,75^2 \text{ (m/s)}^2 = 0,3580 \text{ N} \quad (13)$$

2.2. Vehículo con deflector $F_{A(\beta)}$:

$$F_{A(\beta)(42)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot 0,0149 \text{ (m}^2\text{)} \cdot 1,1358 \text{ (kg/m}^3\text{)} \cdot 11,75^2 \text{ (m/s)}^2 = 0,3741 \text{ N} \quad (14)$$

3. Fuerza de resistencia aerodinámica a 52 km/h y 13°C:

3.1. Vehículo sin deflector $F_{A(\alpha)}$:

$$F_{A(\alpha)(52)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot 0,01426 (\text{m}^2) \cdot 1,1318 (\text{kg/m}^3) \cdot 14,42^2 (\text{m/s})^2 = 0,5370 \text{ N} \quad (15)$$

3.2. Vehículo con deflector $F_{A(\beta)}$:

$$F_{A(\beta)(52)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot 0,0149 (\text{m}^2) \cdot 1,1318 (\text{kg/m}^3) \cdot 14,42^2 (\text{m/s})^2 = 0,5611 \text{ N} \quad (16)$$

4. Fuerza de resistencia aerodinámica a 65 km/h y 15°C:

4.1. Vehículo sin deflector $F_{A(\alpha)}$:

$$F_{A(\alpha)(65)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot 0,01426 (\text{m}^2) \cdot 1,1240 (\text{kg/m}^3) \cdot 18,21^2 (\text{m/s})^2 = 0,8502 \text{ N} \quad (17)$$

4.2. Vehículo con deflector $F_{A(\beta)}$:

$$F_{A(\beta)(65)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot 0,0149 (\text{m}^2) \cdot 1,1240 (\text{kg/m}^3) \cdot 18,21^2 (\text{m/s})^2 = 0,8884 \text{ N} \quad (18)$$

5. Fuerza de resistencia aerodinámica a 70 km/h y 15°C:

5.1. Vehículo sin deflector $F_{A(\alpha)}$:

$$F_{A(\alpha)(70)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot 0,01426 (\text{m}^2) \cdot 1,1240 (\text{kg/m}^3) \cdot 19,59^2 (\text{m/s})^2 = 0,9845 \text{ N} \quad (19)$$

5.2. Vehículo con deflector $F_{A(\beta)}$:

$$F_{A(\beta)(70)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot 0,0149 (\text{m}^2) \cdot 1,1240 (\text{kg/m}^3) \cdot 19,59^2 (\text{m/s})^2 = 1,0287 \text{ N} \quad (20)$$

6. Fuerza de resistencia aerodinámica a 75 km/h y 13°C:

6.1. Vehículo sin deflector $F_{A(\alpha)}$:

$$F_{A(\alpha)(75)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot 0,01426 (\text{m}^2) \cdot 1,1318 (\text{kg/m}^3) \cdot 21,23^2 (\text{m/s})^2 = 1,2127 \text{ N} \quad (21)$$

6.2. Vehículo con deflector $F_{A(\beta)}$:

$$F_{A(\beta)(75)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot 0,0149 (\text{m}^2) \cdot 1,1318 (\text{kg/m}^3) \cdot 21,23^2 (\text{m/s})^2 = 1,3709 \text{ N} \quad (22)$$

- (iii) En tercer lugar, se analiza la fuerza de resistencia de pendiente F_P considerando que el desplazamiento del vehículo se realiza sobre una superficie llana, lo que a su vez implica que se considera nula la fuerza de resistencia de pendiente, a consecuencia de que se contrarrestan las pendientes ascendentes con las pendientes descendentes, las cuales se considerarían positivas y negativas respectivamente.

- (iv) En cuarto y último lugar, se calcula la fuerza de empuje F_E debido a que en la maqueta con deflector existe una tercera fuerza, con sentido contrario a la fuerza de resistencia de rodadura F_R y simultáneamente contrario también a la fuerza de resistencia aerodinámica F_A , de modo que ambas tienen sentido contrario al de circulación del automóvil. Sin embargo, la fuerza de empuje tiene el mismo sentido que el del avance del vehículo, favoreciendo así la impulsión y siendo, por tanto, beneficiosa. Este hecho se debe a que al incorporar el sistema de canalización aerodinámico, se



incrementa la presión en la zona posterior del vehículo, lo que es equivalente a aumentar la velocidad del aire en dicha zona trasera, consiguiendo así disminuir el vacío γ , y por tanto, obteniendo un incremento de la fuerza de empuje desde la parte trasera del vehículo a favor del sentido de circulación.

Para determinar la fuerza de empuje F_E , se utiliza el fundamento de la ecuación (4) asociada a la resistencia aerodinámica, porque se trata de una corriente de aire que impacta sobre un objeto en movimiento, pero en este caso referenciado a la zona trasera del vehículo en vez de a la parte delantera, según se muestra en la ecuación (23).

$$F_{E(\beta)} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S_E \cdot \rho \cdot v_E^2 \quad (23)$$

Asimismo, se resalta el hecho de que la fuerza de empuje únicamente tiene cabida en la circunstancia de tener incorporado el sistema deflector y por lo tanto, tiene asociada solamente una ecuación, la fuerza de empuje con deflector $F_{E(\beta)}$, en vez de la fuerza de resistencia aerodinámica F_A que consta de la ecuación sin deflector y también con deflector.

A continuación, se evalúa de manera individual cada uno de los componentes de la ecuación en orden secuencial (23). En primer lugar, el componente asociado al coeficiente de rozamiento C_x se considera de igual manera como el valor dado por el fabricante para un modelo de carrocería similar, de modo que se le caracteriza con un valor de 0,32.

Seguidamente, para la determinación de la superficie de empuje S_E se considera que la fuerza de empuje puede incidir aproximadamente sobre la mitad de la superficie posterior del vehículo, de modo que se obtiene dividiendo por 2 el valor de la superficie con deflector S_β según la ecuación (24).

$$S_E = \frac{S_\alpha}{2} = \frac{0,01426 \text{ m}^2}{2} = 0,00713 \text{ m}^2 \quad (24)$$

Asimismo, indicar que el valor de la densidad del aire ρ se considera, al igual que en la resistencia aerodinámica F_A , el correspondiente a la altitud 720 m.s.n.m. y la temperatura donde se han realizado los ensayos empíricos.

Por último, el parámetro de la velocidad en la ecuación (23) se corresponde con la velocidad de empuje v_E la cual se relaciona con la diferencia de presiones conseguidas en la parte posterior del vehículo al incorporar el sistema de canalización aerodinámico. Para determinar dicha velocidad de empuje, en primer lugar, se realizan los cálculos en términos de presiones en mmH₂O basándose en las gráficas de la [Figura 4.2](#), ya que en ellas se dispone de los valores medios de la diferencia de presión ($P_\beta - P_\alpha$, [Tabla 3.1](#)) respecto del eje X en los 7 planos (X1, X5, X10, X20, X30, X40 y X50) en los que se han tomado las mediciones. Posteriormente se convierten los valores de presión obtenidos en unidades de mmH₂O a términos de velocidad en unidades de m/s.

El procedimiento de resolución explicado más específicamente, se fundamenta en calcular inicialmente la presión media de empuje para cada una de las velocidades del aire proporcionado por el túnel de viento en la cámara de ensayos (36, 42, 52, 65, 71 y 76 km/h). De esta manera, la presión media de empuje se halla como la diferencia entre la presión de empuje con deflector $P_\beta(X)$



y la presión de empuje sin deflector $P_{\alpha}(X)$ según indica la ecuación 25, lo que representa el área entre la curva con deflector y sin deflector a cada una de las velocidades respectivamente:

$$P_E = P_{\beta}(X) - P_{\alpha}(X) \tag{25}$$

Por tanto, se calcula de manera individual cada una de las 2 presiones de empuje, la presión de empuje con deflector $P_{\beta}(X)$ y la presión de empuje sin deflector $P_{\alpha}(X)$, para lo cual se determinan en primer lugar las respectivas líneas de tendencia, seguidamente se halla la integral entre los límites asociados a las distancias respecto del eje X correspondientes y, por último, se divide por la diferencia entre los valores de los límites.

A continuación, se desarrolla el proceso de cálculo del rendimiento para cada una de las 6 velocidades suministradas por el túnel aerodinámico en orden ascendente: (i) 36 km/h, (ii) 42 km/h, (iii) 52 km/h, (iv) 65 km/h, (v) 71 km/h y (vi) 76 km/h:

(i) Rendimiento del sistema de canalización aerodinámico a 36 km/h:

En primer lugar, se toma como referencia la [Figura 4.2a](#) asociada al análisis del eje X a la velocidad de 36 km/h y sobre ella se estima por un lado, la línea de tendencia asociada a la función con el sistema deflector incorporado $y_{\beta(36)}$ y a su vez, por otro lado, se estima la línea de tendencia asociada a la función sin deflector $y_{\alpha(36)}$ tal y como se representa en la [Figura 4.8](#).

Según se puede observar, ambas líneas de tendencia se cortan en un punto posterior muy próximo al plano X50 lo que implica que el efecto del aire reconducido por la cavidad del sistema de canalización aerodinámico existe hasta prácticamente dicho punto y por tanto, se puede visualizar en la [Figura 4.8](#) el aporte casi completo del sistema deflector.

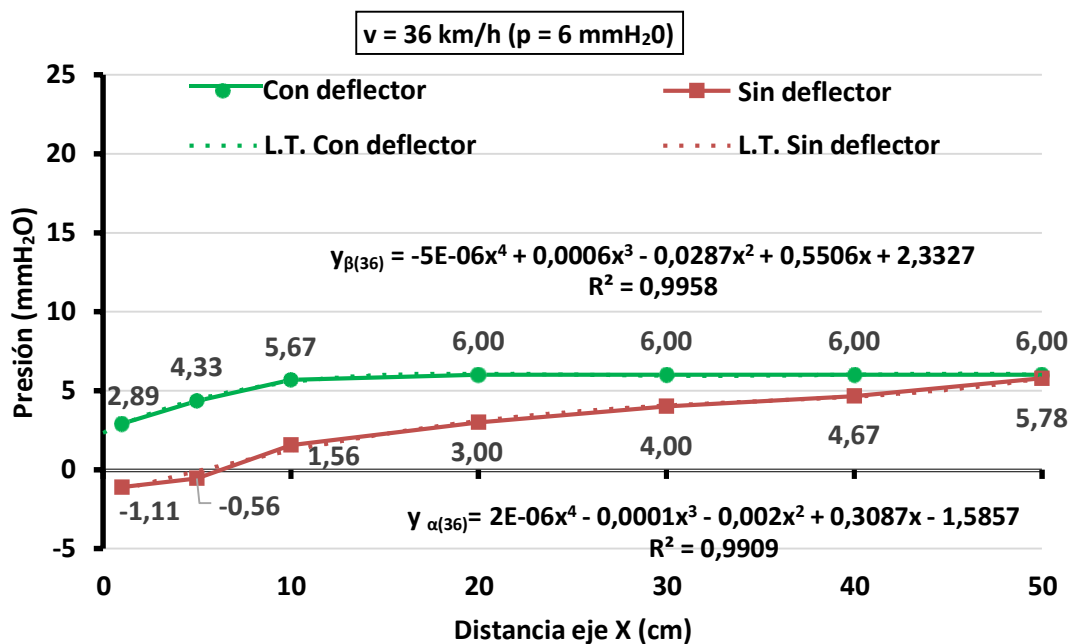


Figura 4.8. Ajuste de líneas de tendencia (L.T.) para 36 km/h.



a. Presión de empuje con deflector $P_{\beta(36)}(X)$:

La función polinómica y_{β} de orden 4 es obtenida por aproximación a los valores reales de la curva de velocidades para el vehículo con deflector según indica la ecuación (26):

$$y_{\beta(36)} = -4,7796 \cdot 10^{-6}x^4 + 6,2169 \cdot 10^{-4}x^3 - 2,8681 \cdot 10^{-2}x^2 + 5,5075 \cdot 10^{-1}x + 2,3327 \quad (26)$$

Seguidamente se calcula la presión de empuje con deflector según la ecuación (27) desarrollando la integral y dividiendo por los límites asociados al valor inicial y final respecto del eje X:

$$\begin{aligned} P_{\beta(36)}(X) &= \frac{\int_0^{50} (-4,7796 \cdot 10^{-6}x^4 + 6,2169 \cdot 10^{-4}x^3 - 2,8681 \cdot 10^{-2}x^2 + 5,5075 \cdot 10^{-1}x + 2,3327) dx}{50 - 0} = \quad (27) \\ &= \frac{\left(\frac{-4,7796 \cdot 10^{-6}x^5}{5} + \frac{6,2169 \cdot 10^{-4}x^4}{4} - \frac{2,8681 \cdot 10^{-2}x^3}{3} + \frac{5,5075 \cdot 10^{-1}x^2}{2} + 2,3327x \right)_0^{50}}{50 - 0} = \\ &= \frac{\left(\frac{-4,7796 \cdot 10^{-6} \cdot (50-0)^5}{5} + \frac{6,2169 \cdot 10^{-4} \cdot (50-0)^4}{4} - \frac{2,8681 \cdot 10^{-2} \cdot (50-0)^3}{3} \right)_0^{50}}{50 - 0} + \\ &\quad \frac{\left(\frac{5,5075 \cdot 10^{-1} \cdot (50-0)^2}{2} + 2,3327 \cdot (50-0) \right)_0^{50}}{50 - 0} = \\ &= \frac{-298,7260 + 971,3949 - 1195,0486 + 688,2090 + 116,6341}{50 - 0} = \\ &= 5,6493 \text{ mmH}_2\text{O} \end{aligned}$$

b. Presión de empuje sin deflector $P_{\alpha(36)}(X)$:

La línea de tendencia sin deflector $y_{\alpha(36)}$ basada en la ecuación (28) se corresponde con una función polinómica de orden 4 y se ha obtenido por aproximación a los valores reales de la curva de velocidades para el vehículo sin deflector.

$$y_{\alpha(36)} = 2,1494 \cdot 10^{-6}x^4 - 1,3166 \cdot 10^{-4}x^3 - 2,0147 \cdot 10^{-3}x^2 + 3,0873 \cdot 10^{-1}x - 1,5857 \quad (28)$$

Consecutivamente se halla la presión de empuje sin deflector tal y como muestra la ecuación (29), es decir, con el mismo procedimiento que la calculada previamente con deflector (27).

$$\begin{aligned} P_{\alpha(36)}(X) &= \frac{\int_0^{50} (2,1494 \cdot 10^{-6}x^4 - 1,3166 \cdot 10^{-4}x^3 - 2,0147 \cdot 10^{-3}x^2 + 3,0873 \cdot 10^{-1}x - 1,5857) dx}{50 - 0} = \quad (29) \\ &= \frac{\left(\frac{2,1494 \cdot 10^{-6}x^5}{5} - \frac{1,3166 \cdot 10^{-4}x^4}{4} - \frac{2,0147 \cdot 10^{-3}x^3}{3} + \frac{3,0873 \cdot 10^{-1}x^2}{2} - 1,5857x \right)_0^{50}}{50 - 0} \\ &= \frac{\left(\frac{2,1494 \cdot 10^{-6} \cdot (50-0)^5}{5} - \frac{1,3166 \cdot 10^{-4} \cdot (50-0)^4}{4} \right)_0^{50}}{50 - 0} + \\ &\quad + \frac{\left(\frac{2,0147 \cdot 10^{-3} \cdot (50-0)^3}{3} + \frac{3,0873 \cdot 10^{-1} \cdot (50-0)^2}{2} - 1,5857(50-0) \right)_0^{50}}{50 - 0} = \end{aligned}$$



$$= \frac{134,3356 - 205,7129 - 83,9440 + 385,9108 - 79,2841}{50 - 0} =$$

$$= 3,0261 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Por tanto, ya se puede obtener la presión de empuje a partir de la ecuación (25) sustituyendo los valores obtenidos de $P_{\beta(36)}(X)$ y $P_{\alpha(36)}(X)$ en las ecuaciones (27) y (29) respectivamente, lo cual se visualiza en la ecuación (30):

$$P_E(36) = 5,6493 \text{ mmH}_2\text{O} - 3,0261 \text{ mmH}_2\text{O} = 2,6232 \text{ mmH}_2\text{O} \quad (30)$$

A continuación, se convierte el valor de la presión de empuje de 2,6232 mmH₂O en términos de velocidad en m/s, de manera que previamente es necesario hacer una conversión de unidades de la presión en mmH₂O a presión en Pascales (Pa) teniendo en cuenta la relación que establece la ecuación (31) [53]:

$$1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9,80665 \text{ Pa} \quad (31)$$

De lo que se obtiene mediante un cálculo de proporcionalidad, un valor equivalente de la presión de empuje de 25,7244 Pa (Tabla 4.4).

Seguidamente, en la ecuación (32) se relaciona la presión y la velocidad:

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (32)$$

donde:

p : presión medida en la columna de agua (Pa).

v : velocidad del aire (m/s).

ρ : densidad del aire (Kg/m³), a 1,225 kg/m³ según ISA a nivel del mar y a 15 °C, pero que a su vez podemos expresar a través de la ecuación (7) para las condiciones de ensayo a esta velocidad.

$$\rho_{(36)} = \frac{P_{atm}}{R \cdot T_{36}} = \frac{101,325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot 720)^{5,2559}}{287,05 \cdot (273,15 + 12)} = 1,1358 \text{ kg/m}^3$$

Posteriormente se despeja la velocidad en la ecuación 32 (Tabla 4.4):

$$v_{(36)} = \sqrt{\frac{2p}{\rho_{36}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 25,7244}{1,1358}} = 6,7302 \text{ m/s}$$

Tabla 4.4. Tabla de conversión a 36 km/h.

Presión (mmH ₂ O)	Presión (Pa)	Velocidad aire (m/s)
2,6232	25,7244	6,7302

Con lo anterior, permite disponer de todos los parámetros que constituyen la fuerza de empuje con el sistema de canalización aerodinámico incorporado (23) y así, encontrarse en condiciones de hallar



la magnitud de la fuerza de empuje media aportada por el sistema deflector en la parte posterior del automóvil $F_{E(\beta)}$ según la ecuación (33).

$$F_{E(\beta)(36)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot \frac{0,01426}{2} \cdot 1,1358 \cdot (6,7302)^2 = 5,8691 \cdot 10^{-2} \text{ N} \quad (33)$$

Por último, una vez definidas las diferentes fuerzas que intervienen tanto en el vehículo con deflector como en el vehículo sin deflector (rodadura, aerodinámica, pendiente y empuje), se realiza el balance final de fuerzas.

Balance de fuerzas en el vehículo sin el sistema de canalización aerodinámico F_{α} (34):

$$F_{\alpha(36)} = F_{R(\alpha)(36)} + F_{A(\alpha)(36)} \quad (34)$$

Se sustituyen los valores obtenidos en las ecuaciones (2) y (11) respectivamente:

$$F_{\alpha(36)} = 2,9106 \cdot 10^{-1} \text{ N} + 2,6849 \cdot 10^{-1} \text{ N} = 5,5955 \cdot 10^{-1} \text{ N} \quad (35)$$

Balance de fuerzas en el vehículo con el sistema de canalización aerodinámico F_{β} (36):

$$F_{\beta(36)} = F_{R(\beta)(36)} + F_{A(\beta)(36)} - F_{E(\beta)(36)} \quad (36)$$

Asimismo, se sustituyen los resultados de las ecuaciones (3), (12) y (33) respectivamente:

$$F_{\beta(36)} = 3,2634 \cdot 10^{-1} \text{ N} + 2,8054 \cdot 10^{-1} \text{ N} - 5,8691 \cdot 10^{-2} \text{ N} = 5,4819 \cdot 10^{-1} \text{ N} \quad (37)$$

Finalmente, el rendimiento se determina a partir de la ecuación (38), de modo que el sistema de canalización aerodinámico proporciona una eficiencia energética del 2,03 % a una velocidad de 36 km/h.

$$\eta_{(36)} = \left(\frac{|F_{\beta(36)} - F_{\alpha(36)}|}{F_{\alpha(36)}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{|5,4819 \cdot 10^{-1} - 5,5955 \cdot 10^{-1}|}{5,5955 \cdot 10^{-1}} \right) \cdot 100 = 2,03 \% \quad (38)$$

(ii) Rendimiento del sistema de canalización aerodinámico a 42 km/h:

En este caso, se toma como referencia la [Figura 4.2b](#) asociada al análisis del eje X a la velocidad de 42 km/h. De modo que en la [Figura 4.9](#) se visualiza que las 2 líneas de tendencia asociadas no llegan a cortarse, lo que implica que el efecto del aire reconducido por la cavidad del sistema de canalización aerodinámico continúa a una distancia superior al plano X50, que es la distancia máxima a la que se puede medir en el túnel de viento construido para esta Tesis.

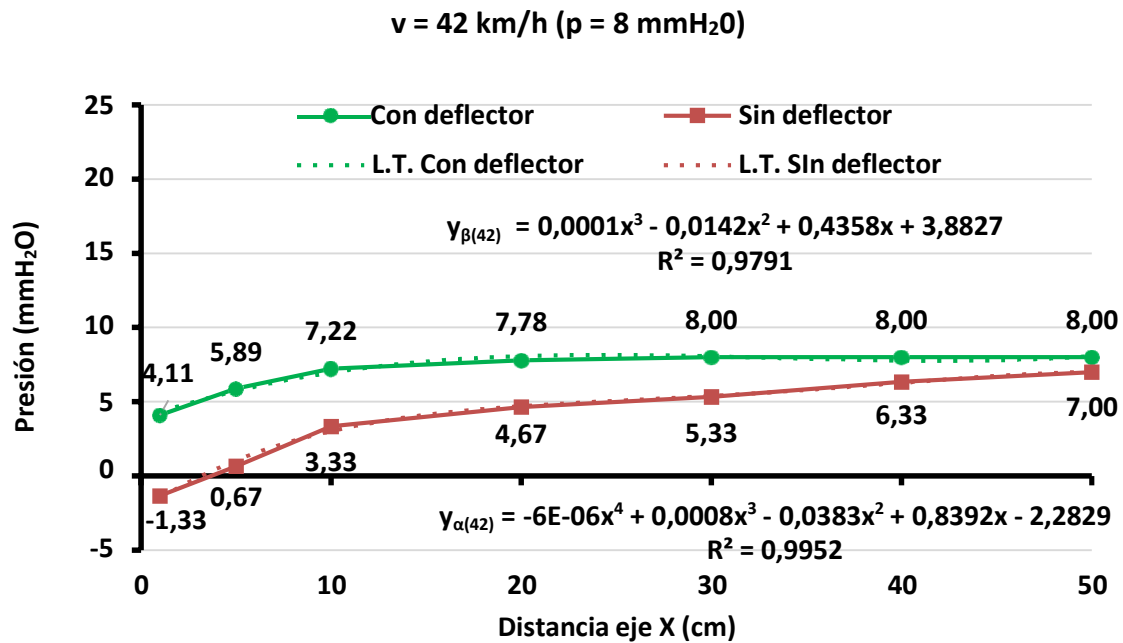


Figura 4.9. Ajuste de líneas de tendencia para 42 km/h.

a. Presión de empuje con deflector $P_{\beta(42)}(X)$:

La función polinómica $y_{\beta(42)}$ de orden 4 es obtenida por aproximación a los valores reales de la curva de velocidades para el vehículo con deflector según indica la ecuación (39):

$$y_{\beta(42)} = -5,2901 \cdot 10^{-6} x^4 + 6,7678 \cdot 10^{-4} x^3 - 3,1023 \cdot 10^{-2} x^2 + 6,0940 \cdot 10^{-1} x + 3,5429 \quad (39)$$

A continuación, se calcula la presión de empuje con deflector según la ecuación (40) desarrollando la integral y dividiendo por los límites asociados al valor inicial y final respecto del eje X:

$$\begin{aligned}
 P_{\beta(42)}(X) &= \frac{\int_0^{50} (-5,2901 \cdot 10^{-6} x^4 + 6,7678 \cdot 10^{-4} x^3 - 3,1023 \cdot 10^{-2} x^2 + 6,0940 \cdot 10^{-1} x + 3,5429) dx}{50 - 0} = \quad (40) \\
 &= \frac{\left(-\frac{5,2901 \cdot 10^{-6} x^5}{5} + \frac{6,7678 \cdot 10^{-4} x^4}{4} - \frac{3,1023 \cdot 10^{-2} x^3}{3} + \frac{6,0940 \cdot 10^{-1} x^2}{2} + 3,5429x \right)_0^{50}}{50 - 0} \\
 &= \frac{\left(-\frac{5,2901 \cdot 10^{-6} \cdot (50 - 0)^5}{5} + \frac{6,7678 \cdot 10^{-4} \cdot (50 - 0)^4}{4} - \frac{3,1023 \cdot 10^{-2} \cdot (50 - 0)^3}{3} + \frac{6,0940 \cdot 10^{-1} \cdot (50 - 0)^2}{2} + 3,5429 \cdot (50 - 0) \right)_0^{50}}{50 - 0} \\
 &= \frac{-330,6287 + 1057,4697 - 1292,6364 + 761,7526 + 177,1426}{50 - 0} \\
 &= 7,4620 \text{ mmH}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

b. Presión de empuje sin deflector $P_{\alpha(42)}(X)$:



La línea de tendencia sin deflector $y_{\alpha(42)}$ basada en la ecuación (41) se corresponde con una función polinómica de orden 4 y se ha obtenido por aproximación a los valores reales de la curva de velocidades para el vehículo sin deflector.

$$y_{\alpha(42)} = -6,2184 \cdot 10^{-6}x^4 + 8,1605 \cdot 10^{-4}x^3 - 3,8322 \cdot 10^{-2}x^2 + 8,3921 \cdot 10^{-1}x - 2,2829 \quad (41)$$

Consecutivamente se halla la presión de empuje sin deflector tal y como muestra la ecuación (42).

$$P_{\alpha(42)}(X) = \frac{\int_0^{50} (-6,2184 \cdot 10^{-6}x^4 + 8,1605 \cdot 10^{-4}x^3 - 3,8322 \cdot 10^{-2}x^2 + 8,3921 \cdot 10^{-1}x - 2,2829) dx}{50 - 0} = \quad (42)$$

$$\frac{\left(-\frac{6,2184 \cdot 10^{-6}x^5}{5} + \frac{8,1605 \cdot 10^{-4}x^4}{4} - \frac{3,8322 \cdot 10^{-2}x^3}{3} + \frac{8,3921 \cdot 10^{-1}x^2}{2} - 2,2829x \right)_0^{50}}{\left(-\frac{6,2184 \cdot 10^{-6} \cdot (50 - 0)^5}{5} + \frac{8,1605 \cdot 10^{-4} \cdot (50 - 0)^4}{4} - \frac{3,8322 \cdot 10^{-2} \cdot (50 - 0)^3}{3} \right)_0^{50} + \frac{8,3921 \cdot 10^{-1} \cdot (50 - 0)^2}{2} - 2,2829(50 - 0)}{50 - 0} =$$

$$\frac{-388,6495 + 1275,0811 - 1596,7581 + 1049,0074 - 114,1445}{50 - 0} =$$

$$= 4,4907 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Por tanto, ya se puede obtener la presión de empuje a partir de la ecuación (23) sustituyendo los valores obtenidos de $P_{\beta(42)}(X)$ y $P_{\alpha(42)}(X)$ en las ecuaciones (40) y (42) respectivamente, lo cual se visualiza en la ecuación (43):

$$P_{E(42)} = 7,4620 \text{ mmH}_2\text{O} - 4,4907 \text{ mmH}_2\text{O} = 2,9713 \text{ mmH}_2\text{O} \quad (43)$$

A continuación, se convierte el valor de la presión de empuje de 2,9713 mmH₂O en términos de velocidad en m/s, de manera que previamente es necesario hacer una conversión de unidades de la presión en mmH₂O a presión en Pascales (Pa) teniendo en cuenta la relación que establece la ecuación (31). De este modo, se obtiene un valor equivalente de la presión de empuje de 29,1382 Pa.

Seguidamente se calcula la velocidad, al igual que se realizó para la velocidad de 36m/s, a través de la ecuación (32), para lo cual se halla previamente la densidad del aire, a través de la ecuación (7) en las condiciones del ensayo, que para esta velocidad es coincidente con la velocidad anterior. Todos estos datos se recopilan en la [Tabla 4.5](#).

$$\rho_{(42)} = \frac{p_{\text{atm}}}{R \cdot T_{42}} = \frac{101.325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot 720)^{5,2559}}{287,05 \cdot (273,15 + 12)} = 1,1358 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v_{(42)} = \sqrt{\frac{2p_{42}}{\rho_{42}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 29,1382}{1,1358}} = 7,1629 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**Tabla 4.5.** Tabla de conversión a 42 km/h.

Presión (mmH ₂ O)	Presión (Pa)	Velocidad aire (m/s)
2,9713	29,1382	7,1629

Ahora se dispone ya de todos los parámetros que constituyen la fuerza de empuje con el sistema de canalización aerodinámico incorporado (23). Por lo tanto, la magnitud de la fuerza de empuje media aportada por el sistema deflector en la parte posterior del automóvil según la ecuación (44). Se puede obtener de la siguiente forma:

$$F_{E(\beta)(42)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot \frac{0,01612}{2} \cdot 1,1358 \cdot (7,1629)^2 = 6,6480 \cdot 10^{-2} \text{ N} \quad (44)$$

Por último, una vez definidas las diferentes fuerzas que intervienen tanto en el vehículo con deflector como en el vehículo sin deflector, se realiza el balance final de fuerzas:

- Balance de fuerzas en el vehículo sin el sistema de canalización aerodinámico $F_{\alpha(42)}$:

$$F_{\alpha(42)} = F_{R(\alpha)(42)} + F_{A(\alpha)(42)} = 2,9106 \cdot 10^{-1} \text{ N} + 3,5799 \cdot 10^{-1} \text{ N} = 6,4905 \cdot 10^{-1} \text{ N} \quad (45)$$

- Balance de fuerzas en el vehículo con el sistema de canalización aerodinámico incorporado $F_{\beta(42)}$ (46):

$$\begin{aligned} F_{\beta(42)} &= F_{R(\beta)(42)} + F_{A(\beta)(42)} - F_{E(\beta)(42)} = \\ &= 3,2634 \cdot 10^{-1} \text{ N} + 3,7405 \cdot 10^{-1} \text{ N} - 6,6480 \cdot 10^{-2} \text{ N} = 6,3391 \cdot 10^{-1} \text{ N} \end{aligned} \quad (46)$$

Finalmente, el rendimiento se determina a partir de la ecuación (47), de modo que el sistema de canalización aerodinámico proporciona una eficiencia energética del 2,3316 % a una velocidad de 42 km/h.

$$\eta_{(42)} = \left(\frac{|F_{\beta(42)} - F_{\alpha(42)}|}{F_{\alpha(42)}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{|6,3391 \cdot 10^{-1} - 6,4905 \cdot 10^{-1}|}{6,4905 \cdot 10^{-1}} \right) \cdot 100 = 2,33 \% \quad (47)$$

(iii) Rendimiento del sistema de canalización aerodinámico a 52 km/h:

Se considera como referente la [Figura 4.2c](#) asociada al análisis del eje X a la velocidad de 52 km/h, sobre la que se representan las líneas de tendencia según la [Figura 4.10](#) de tal manera que ambas líneas tienden a cortarse a una distancia superior a los 50 cm de la parte trasera del vehículo, lo que implica que el efecto del aire reconducido por la cavidad del sistema de canalización aerodinámico también se prolonga hasta un plano posterior.

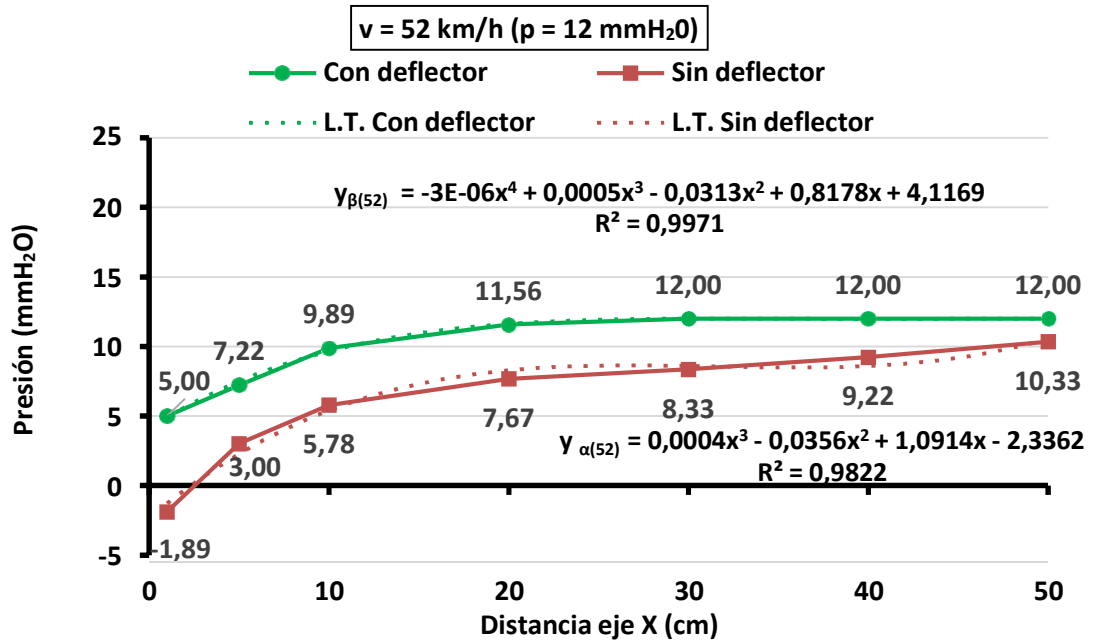


Figura 4.10. Ajuste de líneas de tendencia para 52 km/h.

a. Presión de empuje con deflector $P_{\beta(52)}(X)$:

La función polinómica $y_{\beta(52)}$ de orden 4 es obtenida por aproximación a los valores reales de la curva de velocidades para el vehículo con deflector según indica la ecuación (48):

$$y_{\beta(52)} = -3,2199 \cdot 10^{-6} x^4 + 5,2253 \cdot 10^{-4} x^3 - 3,1278 \cdot 10^{-2} x^2 + 8,1783 \cdot 10^{-1} x + 4,1169 \quad (48)$$

Seguidamente se calcula la presión de empuje con deflector según la ecuación (49) desarrollando la integral y dividiendo por los límites asociados al valor inicial y final respecto del eje X:

$$P_{\beta(52)}(X) = \frac{\int_0^{50} (-3,2199 \cdot 10^{-6} x^4 + 5,2253 \cdot 10^{-4} x^3 - 3,1278 \cdot 10^{-2} x^2 + 8,1783 \cdot 10^{-1} x + 4,1169) dx}{50 - 0} = \quad (49)$$

$$\frac{\left(-\frac{3,2199 \cdot 10^{-6} x^5}{5} + \frac{5,2253 \cdot 10^{-4} x^4}{4} - \frac{3,1278 \cdot 10^{-2} x^3}{3} + \frac{8,1783 \cdot 10^{-1} x^2}{2} + 4,1169x \right)_0^{50}}{\left(-\frac{3,2199 \cdot 10^{-6} \cdot (50 - 0)^5}{5} + \frac{5,2253 \cdot 10^{-4} \cdot (50 - 0)^4}{4} - \frac{3,1278 \cdot 10^{-2} \cdot (50 - 0)^3}{3} + \right)_0^{50}} +$$

$$\frac{\left(\frac{8,1783 \cdot 10^{-1} \cdot (50 - 0)^2}{2} + 4,1169 \cdot (50 - 0) \right)_0^{50}}{50 - 0} =$$

$$= \frac{-201,2408 + 816,4581 - 1303,2706 + 1022,2919 + 205,8441}{50 - 0} =$$

$$= 10,8017 \text{ mmH}_2\text{O}$$

b. Presión de empuje sin deflector $P_{\alpha(52)}(X)$:



La línea de tendencia sin deflector $y_{\alpha(52)}$ basada en la ecuación (50) se corresponde con una función polinómica de orden 4 y se ha obtenido por aproximación a los valores reales de la curva de velocidades para el vehículo sin deflector.

$$y_{\alpha(52)} = -1,4166 \cdot 10^{-5}x^4 + 1,8092 \cdot 10^{-3}x^3 - 8,0745 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,5562x - 3,2465 \quad (50)$$

Consecutivamente se halla la presión de empuje sin deflector tal y como muestra la ecuación (51), es decir, con el mismo procedimiento que la calculada previamente con deflector (49).

$$\begin{aligned}
 P_{\alpha(52)}(X) &= \frac{\int_0^{50} (-1,4166 \cdot 10^{-5}x^4 + 1,8092 \cdot 10^{-3}x^3 - 8,0745 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,5562x - 3,2465) dX}{50 - 0} \quad (51) \\
 &= \frac{\left(-\frac{1,4166 \cdot 10^{-5}x^5}{5} + \frac{1,8092 \cdot 10^{-3}x^4}{4} - \frac{8,0745 \cdot 10^{-2}x^3}{3} + \frac{1,5562x^2}{2} - 3,2465x \right) \Big|_0^{50}}{50 - 0} = \\
 &= \frac{\left(-\frac{1,4166 \cdot 10^{-5} \cdot (50-0)^5}{5} + \frac{1,8092 \cdot (50-0)^4}{4} - \frac{8,0745 \cdot 10^{-2} \cdot (50-0)^3}{3} \right) \Big|_0^{50}}{50 - 0} + \\
 &\quad + \frac{\left(\frac{1,5562 \cdot (50-0)^2}{2} - 3,2465(50-0) \right) \Big|_0^{50}}{50 - 0} = \\
 &= \frac{-885,4019 + 2826,8504 - 3364,3805 + 1945,2805 - 162,3225}{50 - 0} = \\
 &= 7,2005 \text{ mmH}_2\text{O}
 \end{aligned}$$

Por consiguiente, se obtiene la presión de empuje a partir de la ecuación (25) sustituyendo los valores obtenidos de $P_{\beta(52)}(X)$ y $P_{\alpha(52)}(X)$ en las ecuaciones (49) y (51) respectivamente, lo cual se visualiza en la ecuación (52):

$$P_{E(52)} = 10,8017 \text{ mmH}_2\text{O} - 7,2005 \text{ mmH}_2\text{O} = 3,6011 \text{ mmH}_2\text{O} \quad (52)$$

Posteriormente, se convierte el valor de la presión de empuje de 3,6011 mmH₂O en términos de velocidad en m/s considerando la relación que establece la ecuación (31), de lo que se obtiene un valor equivalente de la presión de empuje de 35,3151 Pa (Tabla 4.6).

Después se procede a calcular la velocidad, mediante la ecuación (32), para lo cual se halla previamente la densidad del aire, a través de la ecuación (7) en las condiciones del ensayo (Tabla 4.6):

$$\rho_{(52)} = \frac{p_{\text{atm}}}{R \cdot T_{52}} = \frac{101,325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot 720)^{5,2559}}{287,05 \cdot (273,15 + 13)} = 1,1318 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



$$v_{(52)} = \sqrt{\frac{2p_{52}}{\rho_{52}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 35,3151}{1,1318}} = 7,8994 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tabla 4.6. Tabla de conversión a 52 km/h.

Presión (mmH ₂ O)	Presión (Pa)	Velocidad aire (m/s)
3,6011	35,3151	7,8994

Se calcula la fuerza de empuje media aportada por el sistema deflector en la parte posterior de la maqueta según la ecuación (53), basándose en la ecuación (23).

$$F_{E(\beta)(52)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot \frac{0,01612}{2} \cdot 1,1318 \cdot (7,8994)^2 = 8,0573 \cdot 10^{-2} \text{ N} \quad (53)$$

Balance de fuerzas en el vehículo sin el sistema deflector $F_{\alpha(52)}$ (54):

$$F_{\alpha(52)} = F_{R(\alpha-52)} + F_{A(\alpha-52)} = 2,9106 \cdot 10^{-1} \text{ N} + 5,3698 \cdot 10^{-1} \text{ N} = 8,2804 \cdot 10^{-1} \text{ N} \quad (54)$$

Balance de fuerzas en el vehículo con el deflector incorporado $F_{\beta(52)}$ (55):

$$F_{\beta(52)} = F_{R(\beta-52)} + F_{A(\beta-52)} - F_{E(\beta-52)} = \quad (55)$$

$$3,2634 \cdot 10^{-1} \text{ N} + 5,6108 \cdot 10^{-1} \text{ N} - 8,0573 \cdot 10^{-2} \text{ N} = 8,0685 \cdot 10^{-1} \text{ N}$$

Por último, el rendimiento se halla a partir de la ecuación 52, de modo que el sistema de canalización aerodinámico proporciona una eficiencia energética del 2,5593 % a una velocidad de 52 km/h.

$$\eta_{(52)} = \left(\frac{|F_{\beta(52)} - F_{\alpha(52)}|}{F_{\alpha(52)}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{|8,0685 \cdot 10^{-1} - 8,2804 \cdot 10^{-1}|}{8,2804 \cdot 10^{-1}} \right) \cdot 100 = 2,55 \% \quad (56)$$

(iv) **Rendimiento del sistema de canalización aerodinámico a 65 km/h:**

Se considera la [Figura 4.2d](#) correspondiente al análisis del eje X a la velocidad de 65 km/h, sobre la que se determinan las líneas de tendencia respectivas, representadas en la [Figura 4.11](#), las cuales no se cortan y, a su vez, están más distanciadas entre sí respecto de las anteriores velocidades ([Tabla 4.3](#)).

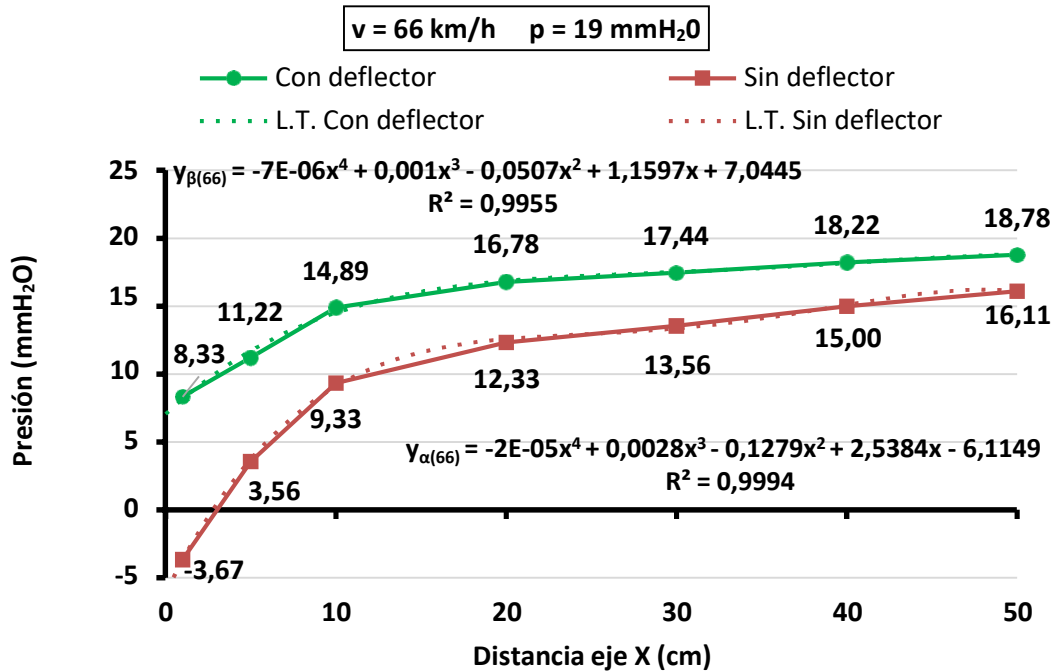


Figura 4.11. Ajuste de líneas de tendencia (L.T.) para 65 km/h.

a. Presión de empuje con deflector $P_{\beta(66)}(X)$:

La función polinómica $y_{\beta(66)}$ de orden 4 es obtenida por aproximación a los valores reales de la curva de velocidades para el vehículo con deflector según indica la ecuación (57):

$$y_{\beta(66)} = -7,2320 \cdot 10^{-6} x^4 + 1,0056 \cdot 10^{-3} x^3 - 5,0694 \cdot 10^{-2} x^2 + 1,1597x + 7,0445 \quad (57)$$

Posteriormente se calcula la presión de empuje con deflector según la ecuación (58) desarrollando la integral y dividiendo por los límites asociados al valor inicial y final respecto del eje X:

$$P_{\beta(66)}(X) = \frac{\int_0^{50} (-7,2320 \cdot 10^{-6} x^4 + 1,0056 \cdot 10^{-3} x^3 - 5,0694 \cdot 10^{-2} x^2 + 1,1597x + 7,0445) dx}{50 - 0} = \quad (58)$$

$$\frac{\left(-\frac{7,2320 \cdot 10^{-6} x^5}{5} + \frac{1,0056 \cdot 10^{-3} x^4}{4} - \frac{5,0694 \cdot 10^{-2} x^3}{3} + \frac{1,1597 \cdot 10^{-1} x^2}{2} + 7,0445x \right) \Big|_0^{50}}{50 - 0} =$$

$$\frac{\left(-\frac{7,2320 \cdot 10^{-6} \cdot (50 - 0)^5}{5} + \frac{1,0056 \cdot 10^{-3} \cdot (50 - 0)^4}{4} - \frac{5,0694 \cdot 10^{-2} \cdot (50 - 0)^3}{3} + \frac{1,1597 \cdot 10^{-1} \cdot (50 - 0)^2}{2} + 7,0445 \cdot (50 - 0) \right) \Big|_0^{50}}{50 - 0} =$$

$$\frac{-451,9986 + 1571,2198 - 2112,2626 + 1449,6416 + 352,2239}{50 - 0} =$$

$$= 16,1765 \text{ mmH}_2\text{O}$$



b. Presión de empuje sin deflector $P_{\alpha(66)}(X)$:

La línea de tendencia sin deflector $y_{\alpha(64)}$ basada en la ecuación (59) se corresponde con una función polinómica de orden 4 y se ha obtenido por aproximación a los valores reales de la curva de velocidades para el vehículo sin deflector.

$$y_{\alpha(66)} = -2,2217 \cdot 10^{-5}x^4 + 2,8320 \cdot 10^{-3}x^3 - 1,2794 \cdot 10^{-1}x^2 + 2,5384x - 6,1149 \quad (59)$$

Consecutivamente se halla la presión de empuje sin deflector tal y como muestra la ecuación (60).

$$\begin{aligned} P_{\alpha(66)}(X) &= \int_0^{50} (-2,2217 \cdot 10^{-5}x^4 + 2,8320 \cdot 10^{-3}x^3 - 1,2794 \cdot 10^{-1}x^2 + 2,5384x - 6,1149) dx = \\ &= \left[-\frac{2,2217 \cdot 10^{-5}x^5}{5} + \frac{2,8320 \cdot 10^{-3}x^4}{4} - \frac{1,2794 \cdot 10^{-1}x^3}{3} + \frac{2,5384x^2}{2} - 6,1149x \right]_0^{50} = \\ &= \left(-\frac{2,2217 \cdot 10^{-5} \cdot (50-0)^5}{5} + \frac{2,8320 \cdot 10^{-3} \cdot (50-0)^4}{4} - \frac{1,2794 \cdot 10^{-1} \cdot (50-0)^3}{3} \right)_0^{50} + \\ &\quad + \left(\frac{2,5384 \cdot (50-0)^2}{2} - 6,1149(50-0) \right)_0^{50} = \\ &= \frac{-1388,5923 + 4424,9520 - 5330,7852 + 3172,9920 - 305,7431}{50 - 0} = \\ &= 11,4566 \text{ mmH}_2\text{O} \end{aligned} \quad (60)$$

De modo que, ya se puede obtener la presión de empuje a partir de la ecuación (25) sustituyendo los valores obtenidos de $P_{\beta(66)}(X)$ y $P_{\alpha(66)}(X)$ en las ecuaciones (58) y (60) respectivamente, lo cual se visualiza en la ecuación (61):

$$P_{E(66)} = 16,1765 \text{ mmH}_2\text{O} - 11,4565 \text{ mmH}_2\text{O} = 4,7200 \text{ mmH}_2\text{O} \quad (61)$$

A continuación, se convierte el valor de la presión de empuje de 4,72 mmH₂O en términos de velocidad en m/s (Tabla 4.7).

Tabla 4.7. Tabla de conversión.

Presión (mmH ₂ O)	Presión (Pa)	Velocidad aire (m/s)
4,7200	46,2875	9,0753

Seguidamente se determina la velocidad mediante la ecuación (32), para lo cual se calcula previamente la densidad del aire, a través de la ecuación (7) en las condiciones del ensayo.



$$\rho_{(66)} = \frac{p_{atm}}{R \cdot T_{66}} = \frac{101.325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot 720)^{5,2559}}{287,05 \cdot (273,15 + 15)} = 1,1240 \text{ kg/m}^3$$

$$v_{(66)} = \sqrt{\frac{2p_{66}}{\rho_{66}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 46,2875}{1,1240}} = 9,0753 \text{ m/s}$$

Consecutivamente se calcula la fuerza de empuje media aportada por el sistema deflector al considerarse incorporado (23).

$$F_{E(\beta)(66)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot \frac{0,01612}{2} \cdot 1,1240 \cdot (9,0753)^2 = 1,0561 \cdot 10^{-1} \text{ N} \quad (62)$$

Por último, una vez definidas las diferentes fuerzas que intervienen tanto en el vehículo con deflector como en el vehículo sin deflector, se realiza el balance final de fuerzas.

Balance de fuerzas en el vehículo sin el sistema de canalización aerodinámico $F_{\alpha(66)}$ (63):

$$F_{\alpha(66)} = F_{R(\alpha-66)} + F_{A(\alpha-66)} = 2,9106 \cdot 10^{-1} \text{ N} + 8,5022 \cdot 10^{-1} \text{ N} = 1,1413 \text{ N} \quad (63)$$

Balance de fuerzas en el vehículo con el sistema de canalización aerodinámico incorporado $F_{\beta(66)}$ (64):

$$\begin{aligned} F_{\beta(66)} &= F_{R(\beta)(66)} + F_{A(\beta)(66)} - F_{E(\beta)(66)} = \\ &= 3,2634 \cdot 10^{-1} \text{ N} + 8,8838 \cdot 10^{-1} \text{ N} - 1,0561 \cdot 10^{-1} \text{ N} = 1,1091 \text{ N} \end{aligned} \quad (64)$$

Finalmente, el rendimiento se determina a partir de la ecuación (65), proporcionando el sistema canalización aerodinámico una eficiencia energética del 2,8186 % a una velocidad de 66 km/h.

$$\eta^{(66)} = \left(\frac{|F_{\beta(66)} - F_{\alpha(66)}|}{F_{\alpha(66)}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{|1,1091 - 1,1413|}{1,1413} \right) \cdot 100 = 2,8186 \% \quad (65)$$

(v) Rendimiento del sistema de canalización aerodinámico a 71 km/h:

En primer lugar, se toma como referencia la [Figura 4.2e](#) asociada al análisis del eje X a la velocidad de 71 km/h y sobre ella se estima la línea de tendencia asociada a la curva con deflector $y_{\beta(71)}$ y a su vez, la línea de tendencia respectiva a la curva sin deflector $y_{\alpha(71)}$ según la [Figura 4.12](#), apreciándose que ambas líneas tampoco se cortan en el plano final X50.

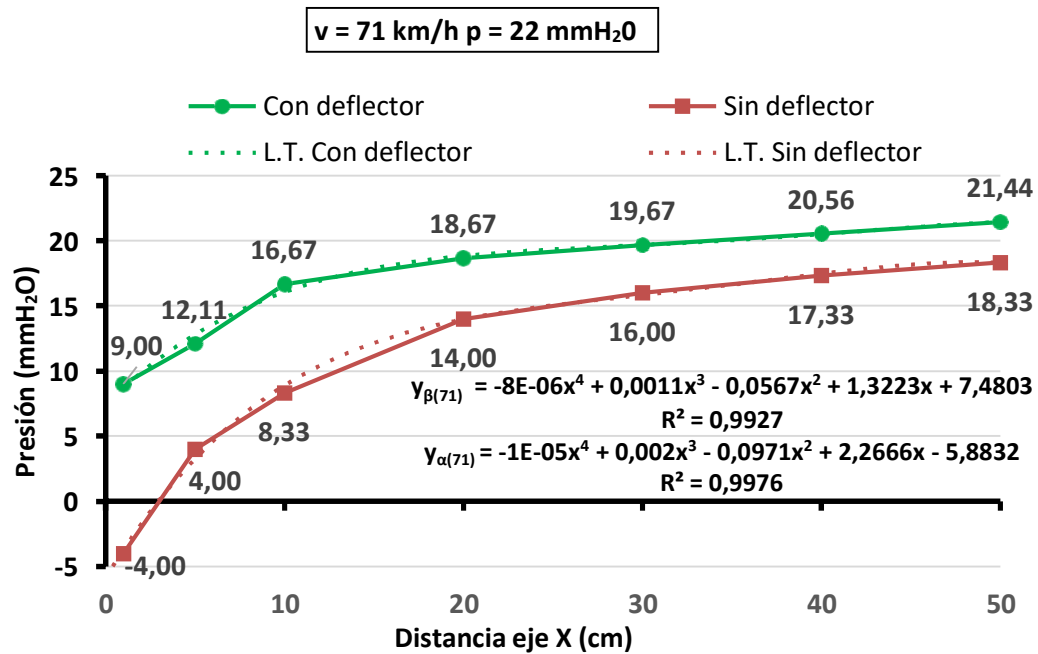


Figura 4.12. Ajuste de líneas de tendencia para 71 km/h.

a. Presión de empuje con deflector $P_{\beta(71)}(X)$:

La función polinómica $y_{\beta(71)}$ de orden 4 es obtenida por aproximación a los valores reales de la curva de velocidades para el vehículo con deflector según indica la ecuación (66):

$$y_{\beta(71)} = -7,7682 \cdot 10^{-6} x^4 + 1,1050 \cdot 10^{-3} x^3 - 5,6683 \cdot 10^{-2} x^2 + 1,3223x + 7,4803 \quad (66)$$

Seguidamente se calcula la presión de empuje sin deflector según la ecuación (67) desarrollando la integral y dividiendo por los límites 50 y 0 respectivamente:

$$P_{\beta(71)}(X) = \frac{\int_0^{50} (-7,7682 \cdot 10^{-6} x^4 + 1,1050 \cdot 10^{-3} x^3 - 5,6683 \cdot 10^{-2} x^2 + 1,3223x + 7,4803) dX}{50 - 0} = (67)$$

$$\frac{\left(-\frac{7,7682 \cdot 10^{-6} x^5}{5} + \frac{1,1050 \cdot 10^{-3} x^4}{4} - \frac{5,6683 \cdot 10^{-2} x^3}{3} + \frac{1,3223x^2}{2} + 7,4803x \right)_0^{50}}{50 - 0} =$$

$$\frac{\left(-\frac{7,7682 \cdot 10^{-6} \cdot (50 - 0)^5}{5} + \frac{1,1050 \cdot 10^{-3} \cdot (50 - 0)^4}{4} - \frac{5,6683 \cdot 10^{-2} \cdot (50 - 0)^3}{3} \right)_0^{50}}{50 - 0} +$$

$$\frac{\left(\frac{1,3223 \cdot (50 - 0)^2}{2} - 7,4803 \cdot (50 - 0) \right)_0^{50}}{50 - 0} =$$

$$\frac{-485,5143 + 1726,5366 - 2361,8004 + 1652,8517 + 374,0140}{50 - 0} = 18,1218 \text{ mmH}_2\text{O}$$



b. Presión de empuje sin deflector $P_{\alpha(71)}(X)$:

La línea de tendencia sin deflector $y_{\alpha(71)}$ basada en la ecuación (68) se corresponde con una función polinómica de orden 4 y se ha obtenido por aproximación a los valores reales de la curva de velocidades para el vehículo sin deflector.

$$y_{\alpha(71)} = -1,4656 \cdot 10^{-5} x^4 + 1,9609 \cdot 10^{-3} x^3 - 9,7063 \cdot 10^{-2} x^2 + 2,2666x - 5,8832 \quad (68)$$

Se halla la presión de empuje sin deflector tal y como muestra la ecuación (69):

$$P_{\alpha(71)}(X) = \frac{\int_0^{50} (-1,4656 \cdot 10^{-5} x^4 + 1,9609 \cdot 10^{-3} x^3 - 9,7063 \cdot 10^{-2} x^2 + 2,2666x - 5,8832) dx}{50 - 0} = \quad (69)$$

$$\left(-\frac{1,4656 \cdot 10^{-5} x^5}{5} + \frac{1,9609 \cdot 10^{-3} x^4}{4} - \frac{9,7063 \cdot 10^{-2} x^3}{3} + \frac{2,2666x^2}{2} - 5,8832x \right) \Big|_0^{50} =$$

$$\frac{\left(-\frac{1,4656 \cdot 10^{-5} \cdot (50-0)^5}{5} + \frac{1,9609 \cdot 10^{-3} \cdot (50-0)^4}{4} - \frac{9,7063 \cdot 10^{-2} \cdot (50-0)^3}{3} \right)_0^{50} + \left(\frac{2,2666 \cdot (50-0)^2}{2} - 5,8832(50-0) \right)_0^{50}}{50-0} =$$

$$\frac{-915,9785 + 3063,8730 - 4044,2769 + 2833,2836 - 294,1598}{50 - 0} =$$

$$= 12,8548 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Se obtiene la presión de empuje a partir de la ecuación (25) sustituyendo los valores de $P_{\beta(71)}(X)$ y $P_{\alpha(71)}(X)$, (67) y (69) respectivamente, según la ecuación (70):

$$P_{E(71)} = 18,1218 \text{ mmH}_2\text{O} - 12,8548 \text{ mmH}_2\text{O} = 5,2669 \text{ mmH}_2\text{O} \quad (70)$$

A continuación, se convierte el valor de la presión de empuje de 5,2669 mmH₂O en términos de velocidad en m/s, para lo que se hace una conversión de unidades de la presión en mmH₂O a presión en Pascales (Pa) teniendo en cuenta la relación que establece la ecuación (31), y se obtiene un valor equivalente de la presión de empuje de 46,2875 Pa (Tabla 4.8).

Tabla 4.8. Tabla de conversión.

Presión (mmH ₂ O)	Presión (Pa)	Velocidad aire (m/s)
5,2669	51,6508	9,5866

Posteriormente, se calcula la velocidad, al igual que hicimos para las velocidades anteriores, a través de la ecuación (32), para lo cual se determina previamente la densidad del aire, a través de la ecuación (7) en las condiciones del ensayo, que para esta velocidad difiere de las anteriores, al ser la temperatura de las medidas distinta.

$$\rho_{(71)} = \frac{P_{atm}}{R \cdot T_{71}} = \frac{101,325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot 720)^{5,2559}}{287,05 \cdot (273,15 + 15)} = 1,1240 \text{ kg/m}^3$$



$$v_{(71)} = \sqrt{\frac{2p_{71}}{\rho_{71}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 51,6508}{1,1240}} = 9,5866 \text{ m/s}$$

Se calcula la fuerza de empuje media aportada por el sistema deflector en la parte posterior del automóvil en base a la ecuación (23), según se observa el desarrollo en la ecuación (71).

$$F_{E(\beta)(71)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot \frac{0,01612}{2} \cdot 1,1240 \cdot (9,5866)^2 = 1,1784 \cdot 10^{-1} \text{ N} \quad (71)$$

Balace de fuerzas en el vehículo sin el sistema deflector $F_{\alpha(71)}$ (72):

$$F_{\alpha(71)} = F_{R(\alpha-71)} + F_{A(\alpha-71)} = 2,9106 \cdot 10^{-1} \text{ N} + 9,8447 \cdot 10^{-1} \text{ N} = 1,2755 \text{ N} \quad (72)$$

Balace de fuerzas en el vehículo con el sistema deflector acoplado $F_{\beta(71)}$ (73):

$$\begin{aligned} F_{\beta(71)} &= F_{R(\beta-71)} + F_{A(\beta-71)} - F_{E(\beta-71)} = \\ &= 3,2634 \cdot 10^{-1} \text{ N} + 1,0287 \text{ N} - 1,1784 \cdot 10^{-1} \text{ N} = 1,2371 \text{ N} \end{aligned} \quad (73)$$

El rendimiento se calcula mediante la ecuación (74), de modo que el sistema de canalización aerodinámica proporciona una eficiencia energética del 3,0089 % a una velocidad de 71 km/h.

$$\eta_{(71)} = \left(\frac{|F_{\beta(71)} - F_{\alpha(71)}|}{F_{\alpha(71)}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{|1,2371 - 1,2755|}{1,2755} \right) \cdot 100 = 3,0089 \% \quad (74)$$

(vi) Rendimiento del sistema de canalización aerodinámico a 76 km/h:

Se parte de la Figura 4.2f asociada al análisis del eje X a 76 km/h para estimar la línea de tendencia de cada curva, con deflector $y_{\beta(76)}$ y sin deflector $y_{\alpha(76)}$ respectivamente, según la Figura 4.13.

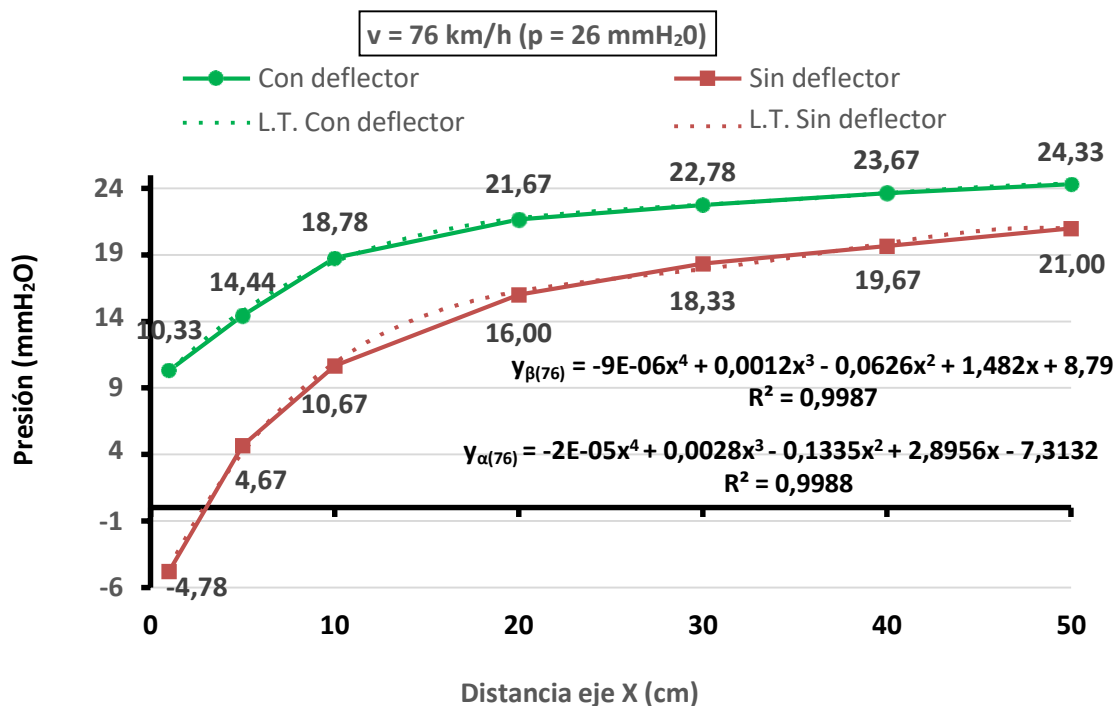


Figura 4.13. Ajuste de líneas de tendencia (L.T.) para 76 km/h.



a. Presión de empuje con deflector $P_{\beta(76)}(X)$:

La función polinómica y_{β} de orden 4 es obtenida por aproximación a los valores reales de la curva de velocidades para el vehículo con deflector según indica la ecuación (75):

$$y_{\beta(76)} = -8,7137 \cdot 10^{-6}x^4 + 1,2188 \cdot 10^{-3}x^3 - 6,2573 \cdot 10^{-2}x^2 + 1,4820x + 8,7900 \quad (75)$$

Se calcula la presión de empuje con deflector según la ecuación (76) desarrollando la integral y dividiendo por los límites asociados al valor final e inicial respecto del eje X, es decir, 50 y 0:

$$\begin{aligned} P_{\beta(76)}(X) &= \frac{\int_0^{50} (-8,7137 \cdot 10^{-6} x^4 + 1,2188 \cdot 10^{-3} x^3 - 6,2573 \cdot 10^{-2} x^2 + 1,4820x + 8,7900) dx}{50 - 0} = & (76) \\ &= \frac{\left(-\frac{8,7137 \cdot 10^{-6} x^5}{5} + \frac{1,2188 \cdot 10^{-3} x^4}{4} - \frac{6,2573 \cdot 10^{-2} x^3}{3} + \frac{1,4820 x^2}{2} + 8,7900x \right)_0^{50}}{50 - 0} = \\ &= \frac{\left(-\frac{8,7137 \cdot 10^{-6} \cdot (50-0)^5}{5} + \frac{1,2188 \cdot 10^{-3} \cdot (50-0)^4}{4} - \frac{6,2573 \cdot 10^{-2} \cdot (50-0)^3}{3} \right)_0^{50}}{50 - 0} + \\ &\quad + \frac{\left(\frac{1,4820 \cdot (50-0)^2}{2} + 8,7900 \cdot (50-0) \right)_0^{50}}{50 - 0} = \\ &= \frac{-544,6061 + 1904,3135 - 2607,2264 + 1852,4705 + 439,5022}{50 - 0} = \\ &= 20,8891 \text{ mmH}_2\text{O} \end{aligned}$$

b. Presión de empuje sin deflector $P_{\alpha(76)}(X)$:

La línea de tendencia sin deflector $y_{\alpha(76)}$ basada en la ecuación (77) se corresponde con una función polinómica de orden 4 y se ha obtenido por aproximación a los valores reales de la curva de velocidades para el vehículo sin deflector.

$$y_{\alpha(76)} = -2,1478 \cdot 10^{-5}x^4 + 2,8111 \cdot 10^{-3}x^3 - 1,3347 \cdot 10^{-1}x^2 + 2,8956x - 7,3132 \quad (77)$$

Consecutivamente se halla la presión de empuje sin deflector según se indica en la ecuación (78):

$$\begin{aligned} P_{\alpha(76)}(X) &= \frac{\int_0^{50} (-2,1478 \cdot 10^{-5} x^4 + 2,8111 \cdot 10^{-3} x^3 - 1,3347 \cdot 10^{-1} x^2 + 2,8956x - 7,3132) dx}{50 - 0} = & (78) \\ &= \frac{\left(-\frac{2,1478 \cdot 10^{-5} x^5}{5} + \frac{2,8111 \cdot 10^{-3} x^4}{4} - \frac{1,3347 \cdot 10^{-1} x^3}{3} + \frac{2,8956 x^2}{2} - 7,3132x \right)_0^{50}}{50 - 0} = \\ &= \frac{\left(-\frac{2,1478 \cdot 10^{-5} \cdot (50-0)^5}{5} + \frac{2,8111 \cdot 10^{-3} \cdot (50-0)^4}{4} - \frac{1,3347 \cdot 10^{-1} \cdot (50-0)^3}{3} \right)_0^{50}}{50 - 0} + \\ &\quad + \frac{\left(\frac{2,8956 \cdot (50-0)^2}{2} - 7,3132(50-0) \right)_0^{50}}{50 - 0} = \end{aligned}$$



$$= \frac{-1342,3651 + 4392,3268 - 5561,0467 + 3619,4604 - 365,6614}{50 - 0} =$$

$$= 14,8543 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Se obtiene la presión de empuje a partir de la ecuación (25) sustituyendo los valores obtenidos de $P_{\beta(76)}(X)$ y $P_{\alpha(76)}(X)$ en las ecuaciones (76) y (78) respectivamente, según la ecuación (79):

$$P_{E(76)} = 20,8891 \text{ mmH}_2\text{O} - 14,8543 \text{ mmH}_2\text{O} = 6,0348 \text{ mmH}_2\text{O} \quad (79)$$

Seguidamente, se convierte el valor de la presión de empuje de 6,0348 mmH₂O en términos de velocidad en m/s, de manera que previamente es necesario hacer una conversión de unidades de la presión en mmH₂O a presión en Pascales en función de la ecuación (31), obteniéndose un valor equivalente de la presión de empuje de 59,1811 Pa (Tabla 4.9).

Tabla 4.9. Tabla de conversión.

Presión (mmH ₂ O)	Presión (Pa)	Velocidad aire (m/s)
6,0348	59,1811	10,2260

A continuación, se calcula la velocidad mediante la ecuación (32), para lo cual se determina a priori la densidad del aire a través de la ecuación (7) en las condiciones del ensayo, de modo que para esta velocidad de 76 km/h se obtiene un valor diferente de los 5 anteriores al ser la temperatura en las mediciones distinta.

$$\rho_{(76)} = \frac{p_{\text{atm}}}{R \cdot T_{76}} = \frac{101,325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot 720)^{5,2559}}{287,05 \cdot (273,15 + 13)} = 1,1318 \text{ kg/m}^3$$

$$v_{(76)} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{76}}{\rho_{76}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 59,1811}{1,1318}} = 10,2260 \text{ m/s}$$

Con los parámetros necesarios calculados, se determina la fuerza de empuje con el sistema de canalización aerodinámico incorporado (23) y se halla la magnitud de la fuerza de empuje media aportada por el sistema deflector en la parte posterior del automóvil según la ecuación (80).

$$F_{E(\beta)(76)} = \frac{1}{2} \cdot 0,32 \cdot \frac{0,01612}{2} \cdot 1,1318 \cdot (10,2260)^2 = 1,3502 \cdot 10^{-1} \text{ N} \quad (80)$$

Una vez definidas las diferentes fuerzas que intervienen tanto en el vehículo con deflector como en el vehículo sin deflector, se realiza el balance final de fuerzas.

Balance de fuerzas en el vehículo sin el sistema de canalización aerodinámico $F_{\alpha(76)}$ (81):

$$F_{\alpha(76)} = F_{R(\alpha-76)} + F_{A(\alpha-76)} = 2,9106 \cdot 10^{-1} \text{ N} + 1,1635 \text{ N} = 1,4545 \text{ N} \quad (81)$$

Balance de fuerzas en el vehículo con el sistema de canalización aerodinámico $F_{\beta(76)}$ (82):

$$F_{\beta(76)} = F_{R(\beta-76)} + F_{A(\beta-76)} - F_{E(\beta-76)} = \quad (82)$$



$$= 3,2634 \cdot 10^{-1} N + 1,2157 N - 1,3502 \cdot 10^{-1} N = 1,4070 N$$

Finalmente, el rendimiento se calcula a partir de la ecuación (83), de modo que el sistema de canalización aerodinámico permite una eficiencia energética del 3,3 % a una velocidad de 76 km/h.

$$\eta_{(76)} = \left(\frac{|F_{\beta(76)} - F_{\alpha(76)}|}{F_{\alpha(76)}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{|1,4070 - 1,4545|}{1,4545} \right) \cdot 100 = 3,2675 \% \quad (83)$$

A continuación, se indica en la [Tabla 4.10](#) el valor del rendimiento conseguido por el sistema de canalización aerodinámico diseñado para cada una de las 6 velocidades del aire incidente en la cámara de ensayos.

Tabla 4.10. Comparativa entre velocidad y rendimiento.

Velocidad (km/h)	Rendimiento (%)
36	2,0304
42	2,3316
52	2,5593
65	2,8186
71	3,0089
76	3,2675

Asimismo, el resultado del rendimiento logrado para cada una de las 6 velocidades se representa mediante una función ([Figura 4.14](#)) que relaciona el rendimiento con la respectiva velocidad a la que ha sido calculado, para mostrar de manera más visual su evolución, observándose que el rendimiento conseguido por el sistema de canalización aerodinámico aumenta progresivamente con el incremento de la velocidad de circulación.

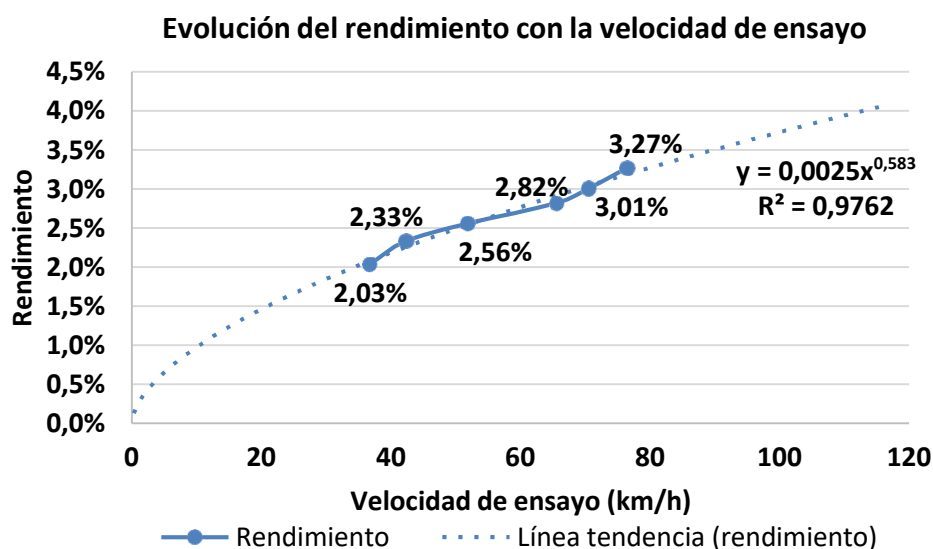


Figura 4.14. Función velocidad-rendimiento.



Simultáneamente se muestra la línea de tendencia (respecto de una función potencial) desde la velocidad mínima de 0 hasta 120 km/h, debido a que es la velocidad de circulación máxima permitida [77], a la que previsiblemente el sistema deflector aportaría una eficiencia energética del 4,1 %.

Por otro lado, cabe mencionar que la totalidad de las mediciones experimentales mostradas en esta investigación, se han realizado posicionando el tubo de Pitot en las mismas condiciones de inclinación, es decir, siguiendo las líneas del flujo de aire de la estela del vehículo convencional sin deflector, la cual es por tanto conocida. Sin embargo, al incorporar el sistema de canalización aerodinámica, el flujo de aire que pasa por su interior es reconducido y, por tanto, no mantiene la dirección de las líneas de flujo de aire del vehículo convencional, lo que implica que no está siendo considerado en totalidad al no ser captado adecuadamente por el tubo de Pitot y por tanto, se desaprovecha parte del efecto proporcionado por el sistema deflector, lo que a su vez deriva en que previsiblemente se tendría que obtener un mayor rendimiento.

4.4. Estudio de viabilidad

En este apartado, se analiza la viabilidad del sistema de canalización aerodinámica ideado correspondiente con la Fase IX (Figura 2.1) del desarrollo de la presente investigación, con el objetivo de valorar su factibilidad de implantación, para lo cual se ha establecido necesario evaluar el sistema deflector a nivel técnico, económico y social, de manera que a continuación se indica el resultado del estudio llevado a cabo en cada uno de los tres niveles mencionados.

4.4.1. Viabilidad técnica

El sistema deflector tiene alta factibilidad técnica de implantación, debido a que el sistema de anclaje es similar al de una baca de almacenaje y se puede colocar en los mismos puntos de anclaje, de modo que la instalación es directa y no precisa ninguna modificación del vehículo ni a nivel estructural ni a nivel de fijación.

Seguidamente, indicar que el sistema deflector se considera como un elemento auxiliar más de los vehículos y de carácter opcional, de modo que cada fabricante tendrá que adaptar el diseño del deflector a su diseño particular de vehículo, al igual que ya realizan sus propios diseños para otros elementos auxiliares ya existentes como, por ejemplo, las barras portaequipajes o cualquier otro elemento considerado adicional, como paragolpes, iluminación o carrocería. Dependiendo del tipo y modelo de vehículo, habrá que realizar modificaciones en el diseño de las respectivas capotas, debido básicamente a las diversas dimensiones, variando a su vez la forma de la curvatura del sistema de canalización aerodinámica, y altura e inclinación de los laterales que sustentan la lámina superior, ya que en cada tipo vehículo será conveniente una cuantía de metros cúbicos de aire entrantes.

No obstante, se establecen varios factores comunes para todos los deflectores, de modo que, en primer lugar, el material necesario para su construcción sería fibra de vidrio. A su vez, los dos laterales del deflector, tendrán la misma curvatura que tenga el techo del vehículo, con el fin de conseguir un correcto ajuste y evitar fugas del flujo de aire canalizado, aunque para conseguir que



sea lo más óptimo posible, en la totalidad de la terminación longitudinal de los laterales del deflector, se instalará una fina lámina de junta de silicona, con el fin de proporcionar estanqueidad, evitar rozamientos con el techo del vehículo y a su vez amortiguar vibraciones y los consecuentes ruidos.

Además, para cada vehículo, se fabricará el deflector con el mismo sistema de anclaje del que ya dispone el vehículo para el que se diseña para su correspondiente portaequipajes, de tal manera que los dos laterales del deflector tendrán en sus respectivos extremos el mismo sistema de anclaje que tienen actualmente las barras transversales. Dichos anclajes quedarán fijados de manera permanente a los extremos laterales del deflector durante la propia fabricación, lo que permitirá poder atornillarlo al correspondiente tipo de anclaje.

A continuación, se describen las soluciones de anclaje del deflector para cada uno de los tres tipos de anclaje que generalmente se utilizan para colocar el portaequipajes:

- El anclaje del portaequipajes consta de cuatro puntos de anclaje: normalmente los coches llevan cuatro puntos de anclaje a modo de tuerca, los cuales están protegidos con tapones de plástico. En esos cuatro puntos es donde actualmente se atornillan las barras del portaequipajes (Figura 4.15), lo que implica que sobre estos cuatro puntos se instalaría directamente el deflector.



Figura 4.15. Anclaje basado en 4 puntos de anclaje.

- El vehículo dispone de barras longitudinales: en este caso las dos barras longitudinales están atornilladas al techo del coche normalmente mediante cuatro puntos de fijación y por otro lado, las barras transversales se fijan sobre las barras longitudinales mediante tornillos. Normalmente las barras transversales sólo se instalan en el vehículo cuando se va a transportar alguna carga, sin embargo, las barras longitudinales suelen mantenerse en el vehículo de manera continuada, ya que su afectación aerodinámica es reducida.

Cabe destacar, que principalmente hay dos tipos de barras longitudinales, por un lado, aquellas en las que toda su longitud está unida al techo del vehículo según la Figura 4.16, de modo que cada lateral del deflector se posicionaría justo encima de su respectiva barra longitudinal, lo que implica que la anchura del sistema deflector, es decir, la anchura de la parte superior, tiene que ser igual a la distancia existente entre las dos barras longitudinales.



Figura 4.16. Barras longitudinales adheridas al techo.



Por otro lado, el segundo tipo corresponde a barras que están elevadas, de modo que hay un espacio libre entre el techo y la barra (Figura 4.17). Esto implica que una opción sería que los laterales del deflector tendrían que quedar por dentro de dichas barras, con el fin de evitar fugas del aire canalizado. Para esto, se tendrían que anclar los laterales del deflector al sistema de anclaje existente de unión de las barras longitudinales con las barras transversales. Y la otra posibilidad es desmontar las barras longitudinales y utilizar sus cuatro puntos de anclaje. Se podrían diseñar los dos tipos de deflector, para ajustarse a las necesidades de cada cliente. A su vez, hay que tener en cuenta que cada modelo de vehículo tiene su propio diseño de barra longitudinal lo cual afecta a su altura final, lo que hay que tener en cuenta para definir la altura de los laterales del deflector.

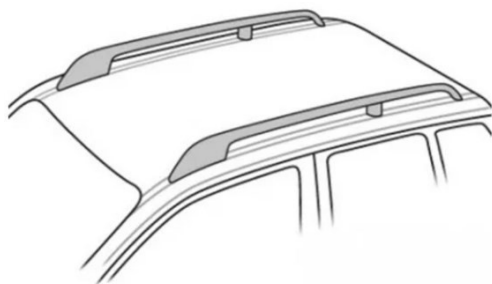


Figura 4.17. Barras longitudinales elevadas.

- El vehículo de fábrica no dispone de puntos de anclaje: ante esta casuística, el portaequipajes se instala sobre cuatro garras que se abrochan a los extremos laterales del techo del vehículo (Figura 4.18), de tal manera que el sistema deflector dispondrá del mismo sistema de anclaje, es decir, las cuatro garras abrochables.



Figura 4.18. Garras abrochables a los extremos laterales del techo.

Por último, mencionar que a nivel general en todos los tipos de sistemas de anclaje para portaequipajes, los cuatro puntos de anclaje son puntos homologados por el fabricante destinados a soportar el peso, esfuerzo y resistencia al flujo de aire incidente. Asimismo, indicar que la carga a transportar, que por ejemplo pueden ser maletas, genera más resistencia que el deflector debido al superior volumen ocupado y también provocado por su mayor peso, ya que por ejemplo una única maleta puede pesar alrededor de 25 kg, mientras que el deflector oscilará en los 10 kg aproximadamente.

Por otro lado, se plantea como posible mejora futura de diseño, que se podría incorporar un sistema hidráulico y motor paso a paso que permita desplazar longitudinal y verticalmente el deflector, para regular el caudal óptimamente en función de las circunstancias meteorológicas, de tal modo que a



mayor velocidad del viento será necesaria menor altura de posicionamiento del deflector, ya que aumenta la presión del aire canalizado.

4.4.2. Viabilidad económica

A continuación, se muestran unos cálculos de estimación de la viabilidad económica, basados en que el consumo del vehículo depende directamente de la potencia desarrollada para moverse, de modo que depende directamente del valor de la fuerza desarrollada y de la velocidad a la que se desplace el automóvil. Por tanto, se puede establecer una relación lineal entre el consumo homologado por el fabricante para el vehículo (sin deflector) y el mismo vehículo al cual se le incorpora el deflector diseñado, teniendo en cuenta la relación de fuerzas generadas entre la maqueta del vehículo sin deflector y con deflector.

Se comienza obteniendo el valor de consumo medio de combustible para el vehículo con deflector C_β teniendo en cuenta que es inversamente proporcional a la fuerza necesaria para el desplazamiento del vehículo y considerando que el consumo medio homologado para un vehículo convencional C_α con carrocería similar y con un modelo 1.9 dCi de 110 CV es de $C_\alpha = 7,4$ l/100 km.

Asimismo, para obtener el valor del consumo medio de combustible para el vehículo con deflector, se necesitan los valores calculados previamente del balance de fuerzas con deflector F_β y el balance de fuerzas sin deflector F_α , los cuales se han calculado en función de la velocidad de circulación, de modo que se van a considerar 2 velocidades, la de 52 km/h y la de 76 km/h. Por consiguiente, se obtendrá la viabilidad económica del sistema de canalización aerodinámica cuando el vehículo circule a estas 2 velocidades, lo que implica realizar el análisis 2 veces de manera paralela.

A continuación, se muestran los cálculos para hallar el ahorro de combustible A_c (l/100 km) de manera independiente para la velocidad 52 km/h y 76 km/h, lo que a su vez permite que se puedan comparar ambas estimaciones posteriormente.

- **Ahorro de combustible a 52 km/h:**

$$C_{\beta(52)} = \frac{F_\beta}{F_\alpha} \cdot C_\alpha = \frac{0,8069 \text{ N}}{0,8280 \text{ N}} \cdot 7,4 \text{ l/100 km} = 7,211 \text{ l/100 km}$$

Por tanto, el ahorro de combustible en l/100 km es de:

$$A_{C(52)} = C_\alpha - C_\beta = 7,4 \text{ l/100 km} - 7,211 \text{ l/100 km} = 0,189 \text{ l/100 km}$$

- **Ahorro de combustible a 76 km/h:**

$$C_{\beta(76)} = \frac{F_\beta}{F_\alpha} \cdot C_\alpha = \frac{1,4070 \text{ N}}{1,4545 \text{ N}} \cdot 7,4 \text{ l/100 km} = 7,158 \text{ l/100 km}$$

De este modo, el ahorro de combustible en l/100km es de:

$$A_{C(76)} = C_\alpha - C_\beta = 7,4 \text{ l/100 km} - 7,158 \text{ l/100 km} = 0,242 \text{ l/100 km}$$

Seguidamente se calcula el beneficio económico, para lo cual se considera el precio medio del combustible Diesel en la Eurozona durante el año 2022, P_c [110], el cual es de 1,87 €/l.



De modo que el ahorro económico A_E (€/100 km) es igual al ahorro de combustible A_c multiplicado por el precio del combustible (1,87 €/l), de modo que se calcula para las 2 velocidades de manera independiente debido a que el ahorro de combustible ya se había calculado previamente en base a la velocidad de circulación.

- **Ahorro económico a 52 km/h:**

$$A_{E(52)} = A_c \cdot P_c = 0,189 \text{ l}/100 \text{ km} \cdot 1,87 \text{ €/l} = 0,353 \text{ €/100 km}$$

- **Ahorro económico a 76 km/h:**

$$A_{E(76)} = A_c \cdot P_c = 0,242 \text{ l}/100 \text{ km} \cdot 1,87 \text{ €/l} = 0,453 \text{ €/100 km}$$

Posteriormente, con el fin de calcular los kilómetros necesarios para amortizar el coste del deflector km_A previamente se estima el precio del deflector, de modo que si se considera como elemento intrínseco de la fabricación en serie del automóvil, el coste oscilaría entre los 150 y 200 €. Hay que tener en cuenta que el diseño del deflector es muy sencillo y, por tanto, los moldes y matrices para su fabricación mediante embutición requerirán poca complejidad. Por otro lado, el proceso de montaje apenas se vería afectado, ya que podría incorporarse el deflector al vehículo al final de la línea de montaje, sin tener que realizar reestructuraciones sobre la línea de montaje.

Sin embargo, si el deflector se quiere instalar sobre un vehículo ya fabricado, el coste sería superior, debido a que el deflector sería considerado como un elemento auxiliar a pesar de que también se fabrique en serie, ya que hay que añadir los costes posteriores a la fabricación, asociados a los talleres de postventa y a la logística requerida, de modo que se estima un coste de unos 300 € aproximadamente. Para esta estimación de costes, se han tenido en cuenta los costes de otras piezas automovilísticas también fabricadas con este material de fibra de vidrio.

Por tanto, se harán dos estimaciones para hallar la amortización del coste del deflector en términos de kilometraje, considerando el coste del deflector respecto del ahorro económico cada 100 km recorridos. En primer lugar, se realiza una estimación para un vehículo nuevo, considerando un coste medio del deflector de 175 €, y en segundo lugar, se halla una estimación considerando que se compra el deflector de manera independiente para un vehículo ya fabricado, es decir, se adquiere el deflector como elemento auxiliar desde un taller de postventa. Asimismo, estos cálculos hay que realizarlos a las dos velocidades ya consideradas previamente de 52 km/h y 76 km/h, comenzando por hallar el número de kilómetros necesarios para amortizar el

- **Kilometraje necesario para amortizar el deflector a 52 km/h:**

- Vehículo nuevo N :

$$km_{A(52)N} = \frac{175 \text{ €}}{0,353 \text{ €/100 km}} = 49.575,1 \text{ km}$$

- Vehículo ya fabricado F :

$$km_{A(52)F} = \frac{300 \text{ €}}{0,353 \text{ €/100 km}} = 84.985,8 \text{ km}$$



▪ **Kilometraje necesario para amortizar el deflector a 76 km/h:**

- Vehículo nuevo:

$$km_{A(76)N} = \frac{175 \text{ €}}{0,453 \text{ €/100 km}} = 38.631,3 \text{ km}$$

- Vehículo ya fabricado:

$$km_{A(76)F} = \frac{300 \text{ €}}{0,453 \text{ €/100 km}} = 66.225,2 \text{ km}$$

Con el fin de comparar los resultados obtenidos, se representan agrupados en la [Tabla 4.11](#) donde se puede observar que a mayor velocidad mayor beneficio en los 4 factores analizados.

		V _c = 52 km/h	V _c = 76 km/h
A_c (l/100 km)		0,189	0,242
A_E (€/100 km)		0,353	0,453
km_A (km)	Veh. nuevo	49.575,1	38.631,3
	Veh. fabricado	84.985,8	66.225,2

Tabla 4.11. Comparativa 2 velocidades.

A continuación, se muestra la [Tabla 4.12](#) en la que se calculan diversos factores en función del kilometraje anual realizado, tanto para una velocidad de 52 km/h como para 76 km/h, con el objetivo de tener diferentes puntos de vista sobre la optimización energética que proporciona el deflector. La información de la [Tabla 4.12](#) se clasifica en 3 columnas principalmente: (i) las denominaciones de los factores a analizar, las cuales se detallan después de la explicación de la presente tabla; (ii) V_c es la velocidad de circulación de la maqueta (km/h); (iii) la distancia recorrida D_R representa el kilometraje realizado anualmente por un vehículo concreto, de tal manera que el kilometraje se subdivide en 5 valores, múltiplos de 10.000 km/año debido a que son valores estándar y comunes, de modo que así se facilita la comprensión de la optimización energética gracias a la incorporación del deflector ante diferentes escenarios.

A su vez, se detalla seguidamente cada uno de los nuevos factores que se cuantifican en la primera columna y se indica un ejemplo de cálculo de cada uno de ellos para la velocidad de 76 km/h.

C_α: representa el consumo de combustible en la maqueta sin el sistema deflector (l), teniendo en cuenta que consume 7,4 l/100km.

$$C_{\alpha} = \frac{7,4 \text{ (l/100km)} \cdot D_R \text{ (km/año)}}{100}$$

Ejemplo para 30.000 km/año:

$$C_{\alpha} = \frac{7,4 \text{ (l/100km)} \cdot 30.000 \text{ (km/año)}}{100} = 2.220 \text{ l}$$



C_{β} : simboliza el consumo de combustible con el sistema de canalización aerodinámico (I), basándose en que consume 7,158 l/100km).

$$C_{\beta} = \frac{7,158 \text{ (l/100km)} \cdot D_R \text{ (km/año)}}{100}$$

Ejemplo para 30.000 km/año:

$$C_{\beta} = \frac{7,158 \text{ (l/100km)} \cdot 30.000 \text{ (km/año)}}{100} = 2.147,4 \text{ l}$$

A_{CA} : es el ahorro de combustible generado en un año (l).

$$A_{CA} = C_{\alpha} - C_{\beta}$$

Ejemplo para 30.000 km/año:

$$A_{CA} = 2.220 \text{ l} - 2.147,4 \text{ l} = 72,6 \text{ l}$$

A_{EA} : es el ahorro económico anual (€) y se calcula multiplicando el ahorro de combustible generado en un año por el precio medio del combustible en el año 2022 en la Eurozona, P_C .

$$A_{EA} = A_{CA} \cdot P_C$$

Ejemplo para 30.000 km/año:

$$A_{EA} = 72,6 \text{ l} \cdot 1,87 \text{ €/l} = 135 \text{ €}$$

km_G : hace referencia a los kilómetros equivalentes de ganancia, es decir, el kilometraje equivalente que se puede realizar debido a la mejora que proporciona el deflector.

$$km_G = \frac{A_{CA}}{C_{\beta}} \cdot 100$$

Ejemplo para 30.000 km/año a 52 km/h:

$$km_G = \frac{56,7}{7,211} \cdot 100 = 786,3 \text{ km}$$

Ejemplo para 30.000 km/año a 76 km/h:

$$km_G = \frac{72,6}{7,158} \cdot 100 = 1.014,3 \text{ km}$$



Tabla 4.12. Análisis en función del kilometraje anual.

	V _c (km/h)	Distancia recorrida (km/año)				
		10.000	20.000	30.000	40.000	50.000
C_α (l)	N/A	740	1.480	2.220	2.960	3.700
C_β (l)	52	721,1	1.442,2	2163,3	2884,4	3605,5
	76	715,8	1.431,6	2.147,4	2863,2	3579
A_{CA} (l)	52	18,9	37,8	56,7	75,6	94,5
	76	24,2	48,4	72,6	96,8	121
A_{EA} (€)	52	35,3	70,7	106	141,4	176,7
	76	45,3	90,5	136	181	226,3
km_G (km)	52	262,1	524,2	786,3	1.048,4	1.310,5
	76	338,1	676,2	1.014,3	1.352,3	1.690,4

Asimismo, indicar que, si alguien necesitase que le montasen el deflector en su vehículo, el precio aproximado de la instalación no debería superar los 50 €, debido a que el deflector sólo pesaría unos 10 kg y requiere colocar los sistemas de anclaje que se basan en apretar cuatro tornillos, un tornillo por cada uno de los cuatro puntos de anclaje.

4.4.3. Viabilidad social

Respecto a la viabilidad social, se prevé que el sistema de canalización aerodinámico tenga una buena aceptación por parte de la sociedad, debido a las ventajas competitivas que ofrece, basándose el análisis en los cuatro factores fundamentales que afectan a su posible implementación, los cuales son, el factor económico, técnico, medioambiental y estético.

En primer lugar, se considera el factor económico, el cual se basa en el estudio realizado en el apartado de viabilidad económica, donde se analizó la comparativa entre los costes asociados y el ahorro económico conseguido, originado por la disminución de consumo de combustible. De la comparativa se obtiene que es muy favorable el ahorro económico, con un período de tiempo de amortización relativamente corto. Asimismo, hay que tener en cuenta que un factor previsiblemente prioritario por la sociedad es la economía y más aún considerando el elevado precio de los combustibles [111], a lo que hay que añadir su tendencia de crecimiento, la escasez de ciertos combustibles y la concienciación medioambiental cada vez más arraigada con el objetivo de optimizar lo máximo posible los recursos energéticos.



En segundo lugar, se valora el factor técnico, asociado a la factibilidad de instalar y desinstalar el sistema deflector, debido a que se coloca sobre los mismos puntos de anclaje que utiliza el sistema portaequipajes y que tiene un reducido peso (aproximadamente unos 10 kg). Por ello, se puede concluir que la incorporación del sistema de canalización es sencilla y rápida, al igual que sucede con la retirada del mismo, pudiendo realizar ambos movimientos el propio conductor del vehículo sin requerir la ayuda de un taller de postventa.

En tercer lugar, respecto a la influencia del factor medioambiental, primeramente, se recuerda que el hecho de lograr disminuir el consumo de combustible, permite obtener un gran beneficio medioambiental [112]. Debido a que la concienciación social sobre asuntos medioambientales cada vez está más arraigada y está adquiriendo la importancia merecida, se determina que el sistema de canalización aerodinámico tendrá una alta aceptación en términos medioambientales. Asimismo, es necesario indicar que además de valorar socialmente la ventaja medioambiental de disminuir el consumo de combustibles, se valora significativamente el principio de funcionamiento del sistema deflector, ya que está basado en una nueva metodología de aprovechamiento del aire en automoción.

Cabe destacar que se adquieren diversas ventajas al utilizar el aire como recurso energético, debido a que es una fuente de energía renovable, no contaminante, es inagotable y permite reducir el uso de otros recursos energéticos, entre ellos los combustibles fósiles, origen de las emisiones de efecto invernadero que causan el calentamiento global, reduciendo así emisiones de CO₂ a la atmósfera, lo que conlleva a lograr disminuir la huella de carbono. Asimismo, la energía eólica es una energía autóctona, lo que contribuye a reducir las importaciones energéticas. Por ende, la optimización del aprovechamiento del aire en el sector de la automoción gracias al sistema de canalización aerodinámico, contribuye al desarrollo sostenible.

Y como cuarto y último factor, se analiza el cambio estético que conlleva la incorporación del deflector en la parte superior de los vehículos. Por un lado, hay que considerar que el deflector se podría pintar del mismo color que el propio vehículo y que la forma del deflector sería similar a la del techo del propio automóvil, de modo que en esos dos aspectos pasaría relativamente desapercibido. Aunque, por otro lado, la incorporación del deflector afectaría a la estética en cuanto a la proporción de volumen del vehículo, debido a que serían vehículos un poco más altos manteniéndose la longitud. No obstante, considerando los tres aspectos estéticos mencionados, se estima que tienen menor importancia para un conductor que por el ejemplo el factor económico. Sin embargo, es ineludible que el nicho de mercado ocupado por los vehículos deportivos y, sobre todo, los de alta gama, generalmente prioriza la estética respecto a los costes económicos, por lo que se descarta la implantación del deflector en este segmento de vehículos.

Finalmente, haciendo un balance global de los cuatro factores, se concluye que el sistema de canalización aerodinámico es viable socialmente, debido a que los tres factores más influyentes, el factor económico, el técnico y el factor medioambiental, son favorables, y superan la contraposición del factor estético, exceptuando los coches deportivos, ya que el factor estético tiene un peso menor que los otros tres factores.



4.5. Investigacións futuras

A continuación, se plantean cuatro ideas como posibles líneas de investigación para desarrollar en un futuro, con el objetivo de optimizar la posible implementación del sistema de canalización aerodinámico en el sector automovilístico:

- Con la finalidad de mejorar la regulación del caudal de aire canalizado por el interior de la cavidad constituida por el sistema deflector, se plantea incorporar un sistema hidráulico y un motor paso a paso que permita desplazar longitudinal y verticalmente el deflector en función de las circunstancias medioambientales.
- Los dos laterales verticales del deflector dispongan de una curvatura convexa, en vez de, tener una superficie recta, ya que previsiblemente esta geometría permitiría que se incrementase el rendimiento del sistema de canalización aerodinámico, debido a que a nivel global aumenta la velocidad del flujo de aire que discurre por el interior mismo, debido a que inicialmente se reduce la sección, lo que conlleva a que se aumente la velocidad del flujo de aire, para seguidamente aumentarse la sección debido a la convexidad y por tanto, se disminuya la velocidad, para finalmente reducirse la sección en la salida y aumentar nuevamente la velocidad del flujo de aire. Con esta nueva idea estructural de aportar convexidad a ambos laterales, se vaticina que a su vez, se permitiría amortiguar las posibles perturbaciones que se puedan llegar a producir en el interior de la cavidad del sistema de canalización aerodinámico, basado en el efecto que se origina en un dispositivo silencioso de un vehículo.
- Incorporar placas solares fotovoltaicas al propio sistema de canalización aerodinámico en vehículos eléctricos, bien sean 100 % eléctricos o híbridos, ya que la condición es simplemente que tengan la tipología eléctrica sin influir la magnitud. Se tienen que fabricar los sistemas deflectores considerando este complemento de forma que quede totalmente integrado para optimizar el diseño, en vez de incorporar las placas fotovoltaicas a sistemas deflectores ya fabricados. Al complementar al sistema deflector con placas solares fotovoltaicas se incrementaría el coste y el peso del mismo, lo que conllevaría una disminución del rendimiento, sin embargo, la producción de energía eléctrica que proporcionan las placas solares fotovoltaicas compensaría ampliamente el rendimiento final.
- Analizar la incorporación del sistema de canalización aerodinámico en distintos modelos de coche para evaluar la implicación de la geometría de la carrocería.
- Investigar la influencia de este sistema de canalización aerodinámico ideado inicialmente en coches para incorporarlo también en furgonetas y a su vez, paralelamente en camiones, debido a que, en ambas tipologías de vehículos, previsiblemente aportaría mejores resultados. La idea se fundamenta en que las furgonetas y camiones constan de peor aerodinámica respecto de los coches al disponer normalmente su cara trasera de una geometría de plano recto sin apenas curvaturas. Asimismo, se pretende cuantificar la comparativa de los respectivos resultados entre sí.



4.6. Transferencia y repercusión de la investigación

4.6.1. Artículo de investigación

A raíz de la investigación desarrollada para esta Tesis Doctoral, se ha publicado en enero de 2023 el artículo “An Original Aerodynamic Ducting System to Improve Energy Efficiency in the Automotive Industry” en la revista *Inventions* de la editorial MDPI, en el volumen 8, edición 1, página 13, incluido en la edición especial “Recent Advances in Fluid Mechanics and Transport Phenomena” ([Anexo C](#)). Esta revista está indexada en JCI (Q1) y está pendiente de recibir su primer índice de impacto en la base JCR para Junio 2023.

En dicho artículo, se explica el fundamento del sistema de canalización aerodinámica ideado para automoción, el proceso empírico llevado a cabo mediante el cual se verifica la eficiencia del deflector, así como una cuantificación del rendimiento conseguido y un estudio de viabilidad. No obstante, hay principalmente dos diferencias significativas entre los ensayos experimentales mostrados en el artículo de investigación y los ensayos realizados en la presente tesis doctoral, de modo que la primera diferencia se basa en el hecho de que en el artículo, la velocidad máxima alcanzada por el túnel de viento era de 50 km/h, la cual es proporcionada por el ventilador succionador instalado a la salida, mientras que en el estudio posterior realizado para el desarrollo de la tesis doctoral, se ha incorporado adicionalmente un ventilador impulsor a la entrada del túnel de viento, se han avellanado la entrada y salida de los 4.600 tubos del acondicionador de flujo y se ha cambiado el túnel de viento de ubicación (antes estaba dentro de una nave y ahora se ha sacado al exterior para favorecer la entrada de aire), permitiendo alcanzar una velocidad máxima de 76 km/h. Asimismo, se han registrado las mediciones a las velocidades intermedias de 65 y 71 km/h con el fin de evaluar con mayor detalle la evolución del comportamiento del flujo de aire al incorporar el sistema de canalización aerodinámico.

4.6.2. Modelo de utilidad

La idea del sistema de canalización aerodinámico presentada en esta Tesis Doctoral se ha registrado en la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM), con la finalidad de protegerla mediante un modelo de utilidad.

La solicitud se encuentra en proceso, concretamente en la fase de corrección de defectos resultantes del examen de oficio.



5. CONCLUSIONES

Se ha estudiado y diseñado un original sistema de canalización para automóviles que permite transformar la idea de que el aire es un problema en una ventaja, aprovechando la gran fuerza del flujo de aire incidente en la parte delantera del vehículo. Esta idea innovadora planteada en esta Tesis Doctoral se basa en un deflector que se posiciona en la parte superior de los vehículos a modo de cavidad, que permite captar, canalizar y redireccionar el aire a la zona posterior de vacío proporcionando presiones superiores, lo que conlleva varios hitos:

- Disminuir la resistencia aerodinámica causada por las presiones negativas de la zona de vacío, ya que en todas las circunstancias se consigue eliminar dicho vacío.
- Reducir la resistencia aerodinámica en los puntos donde no hay depresión ya que se alcanzan presiones superiores en todos los puntos.
- Solventar el problema de generación de vacío en la parte trasera de los vehículos, favoreciendo la propulsión del vehículo al haberse comprobado que el flujo de aire reconducido a la zona posterior permite que la zona donde convencionalmente se genera un vacío, con el consiguiente arrastre, se convierta en una zona con todas las presiones positivas y de mayor valor. De esta forma se puede eliminar esta fuerza resistiva e incluso se genere una nueva fuerza motriz que facilite la propulsión de los vehículos.

Se ha corroborado la eficacia del sistema de canalización aerodinámico en primer lugar a través de una modelización computacional, al observarse que se rellena parcialmente la zona de vacío de la estela gracias al flujo de aire que se consigue redireccionar.

A su vez, dichos logros se han verificado experimentalmente mediante 756 mediciones tomadas en un túnel de viento, demostrando que se solventa el problema de la generación de depresión en la parte posterior de los automóviles, gracias al aporte de flujo de aire reconducido a través del deflector. Se verifica que dicho flujo de aire permite que la zona donde se genera convencionalmente vacío, con la consecuente resistencia al avance que implica, se convierta en una zona con presiones positivas, logrando eliminar la fuerza resistiva e incluso gracias al sistema deflector se dispone de fuerza impulsora que favorece la impulsión de los vehículos. De este modo, a una velocidad de 76 km/h el sistema de canalización aerodinámico proporciona una eficiencia energética del 3,3 %.

Asimismo, se ha conseguido llegar a eliminar una resistencia de 5 mmH₂O equivalente a succionar con un flujo de aire de 33,3 km/h, de modo que, en los mismos puntos, se ha logrado transformar ese freno en un impulso al avance, siendo el impulso equivalente a un flujo de aire de 19 mmH₂O, es decir, flujo de aire con una velocidad de 65 km/h empujando al vehículo desde detrás hacia delante (favoreciendo su movimiento en el sentido de circulación).

Por último, indicar que la factibilidad de implantación del sistema de canalización aerodinámico a nivel técnico, económico, social y medioambiental, resulta favorable, pudiendo concluir que la idea del sistema de canalización aerodinámico diseñado, se ha convertido en solución y, además, para todo tipo de alternativas de propulsión de los vehículos.



Referencias

1. Semeraro, F.F.; Schito, P. Numerical Investigation of the Influence of Tire Deformation and Vehicle Ride Height on the Aerodynamics of Passenger Cars. *Fluids* 2022, 7, 47. <https://doi.org/10.3390/fluids7020047>.
2. Regulation (EU) 2019/631 of the European parliament and of the council of 17 April 2019 setting CO₂ emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing regulations (ec) no 443/2009 and (eu) no 510/2011. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/ALL/?uri=CELEX:32019R0631> (accessed on 25 November 2022).
3. United Nations General Assembly Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Available online: <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
4. Pakulska, T. Green Energy in Central and Eastern European (CEE) Countries: New Challenges on the Path to Sustainable Development. *Energies* 2021, 14, 884. <https://doi.org/10.3390/en14040884>.
5. Ossewaarde, M.; Ossewaarde-Lowtoo, R. The EU's Green Deal: A Third Alternative to Green Growth and Degrowth? *Sustainability* 2020, 12, 9825. <https://doi.org/10.3390/su12239825>.
6. Pietrzak, M.B.; Olczyk, M.; Kuc-Czarnecka, M.E. Assessment of the Feasibility of Energy Transformation Processes in European Union Member States. *Energies* 2022, 15, 661. <https://doi.org/10.3390/en15020661>.
7. Tian, J.; Yu, L.; Xue, R.; Zhuang, S.; Shan, Y. Global low-carbon energy transition in the post-COVID-19 era. *Appl. Energy* 2022, 307, 118205. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118205>.
8. United Nations Economic Commission for Europe. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29). How It Works, How to Join It. New York and Geneva: Economic Commission for Europe, United Nations. Available online: https://unece.org/sites/default/files/2022-07/ECE_TRANS_289_Rev.1_E_corrected.pdf (accessed on 28 November 2022).
9. Höök M.; Xu Tang. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change. *Energy Policy*, 2013 Volume 52, 797-809, ISSN 0301-4215. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.046>.
10. Urquhart, M.; Varney, M.; Sebben, S.; Passmore, M. Aerodynamic drag improvements on a square-back vehicle at yaw using a tapered cavity and asymmetric flaps. *Int. J. Heat Fluid Flow* 2020, 86, 108737 <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2020.108737>.
11. Kang, S.O.; Jun, S.O.; Park, H.I.; Song, K.S.; Kee, J.D.; Kim, K.H.; Lee, D.H. Actively translating a rear diffuser device for the aerodynamic drag reduction of a passenger car. *Int. J. Automot. Technol.* 2012, 13, 583–592. <https://doi.org/10.1007/s12239-012-0056-x>.
12. Vahdati, M.; Beigmoradi, S.; Batooei, A. Minimising drag coefficient of a hatchback car utilising fractional factorial design algorithm. *Eur. J. Comput. Mech.* 2018, 27, 322–341. <https://doi.org/10.1080/17797179.2018.1550962>.



13. Ganesh Kumar; Amit Sahay; Kamlesh Shivvedi. CFD Analysis on the Effect of the Change in Profile Geometry on Drag Reduction of a Sedan Car. *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol.10, No.5 (Sept/Oct 2020). <https://doi.org/10.14741/ijcet/v.10.5.5>.
14. Song, J.; Yoshioka, S.; Kato, T.; Kohama, Y. Characteristics of Flow Behind a Passenger Vehicle; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2006. <https://doi.org/10.4271/2006-01-1030>.
15. Katz, J. Race Car Aerodynamics. Bentley Publishers. 2008. ISBN: 978-0-8376-0142-7. <http://www.bentleypublishers.com/c/GAER>.
16. Moghimi, P.; Rafee, R. Numerical and Experimental Investigations on Aerodynamic Behavior of the Ahmed Body Model with Different Diffuser Angles. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2018. <https://doi.org/10.29252/jafm.11.04.27923>.
17. Asif Ahmed; Murtaza M.A. CFD analysis of diffuser in a car for downforce generation. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 05, 07. 158-164. 2016. <https://doi.org/10.15623/ijret.2016.0507026>.
18. P.N. Selvaraju, Kumar S. Effect of external devices on aerodynamic performance of SUV car model, *Materials Today: Proceedings*, 68, 5, 2022, 1273-1279, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.235>.
19. Yu, X.; Jia, Q.; Yang, Z. Comprehensive Study of the Aerodynamic Influence of Ground and Wheel States on the Notchback DrivAer. *Energies* 2022, 15, 1124. <https://doi.org/10.3390/en15031124>.
20. Satya P. Mavuri; Watkins S. The influence of wheel–housing shape on vehicle aerodynamic performance. 2011, 57, 2-3. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2011.044726>.
21. Wang, Y.; Sicot, C.; Borée, J.; Grandemange, M. Experimental study of wheel-vehicle aerodynamic interactions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2020, 198, 104062. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104062>
22. Ha, J.; Jeong, S.; Obayashi, S. Drag reduction of a pickup truck by a rear downward flap. *Int. J. Automot. Technol.* 2011, 12, 369–374. <https://doi.org/10.1007/s12239-011-0043-7>.
23. Al-Saadi, A., Al-Farhany, K., Idan Al-Chlaihawi, K.K. et al. Improvement of the aerodynamic behavior of a sport utility vehicle numerically by using some modifications and aerodynamic devices. *Sci Rep*, 2022, 12, 20272. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24328-w>.
24. Lo, K.H.; Kontis, K. Flow around an articulated lorry model. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2017, 82, 58–74. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.11.003>.
25. Afianto, D.; Han, Y.; Yan, P.; Yang, Y.; Elbarghthi, A.F.A.; Wen, C. Optimisation and Efficiency Improvement of Electric Vehicles Using Computational Fluid Dynamics Modelling. *Entropy* 2022, 24, 1584. <https://doi.org/10.3390/e24111584>.
26. Katz, J.; Garcia, D. Aerodynamic Effects of Indy Car Components; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2002. <https://doi.org/10.4271/2002-01-3311>.



27. Yang, Z.D & Jin, Yifeng & Gu, Zhengqi. Aerodynamic Shape Optimization Method of Non-Smooth Surfaces for Aerodynamic Drag Reduction on A Minivan. *Fluids*. 2021, 6, 365. <http://dx.doi.org/10.3390/fluids6100365>.
28. Bayındırlı, Cihan; Mehmet, M. Experimental optimization of aerodynamic drag coefficient of a minibus model with non-smooth surface plate application. *Journal of Engineering Studies and Research*. 2023, 28, 34-40. <https://doi.org/10.29081/jesr.v28i4.004>.
29. Altaf, A.; Omar, A.A.; Asrar, W. Passive drag reduction of square back road vehicles. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* 2014, 134, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.08.006>.
30. Haydar Kepekci. Investigation of The Effect of the Use of Top Deflectors on Aerodynamic Performance in Vehicles with CFD Analysis. 6th International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'22) At: Konya, Turkey. E-ISBN: 978-605-72066-2-6.
31. Piechna, J. A Review of Active Aerodynamic Systems for Road Vehicles. *Energies* 2021, 14, 7887. <https://doi.org/10.3390/en14237887>.
32. Littlewood, R.; Passmore, M. The Optimization of Roof Trailing Edge Geometry of a Simple Square-Back; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2010. <https://doi.org/10.4271/2010-01-0510>.
33. Piechna, J.R.; Kurec, K.; Broniszewski, J.; Remer, M.; Piechna, A.; Kamieniecki, K.; Bibik, P. Influence of the Car Movable Aerodynamic Elements on Fast Road Car Cornering. *Energies* 2022, 15, 689. <https://doi.org/10.3390/en15030689>.
34. Stephen Con-way Per Elofsson Ola Lögdberg. ES2537393T3. Air baffle with whirlpool generator and freight transport vehicle equipped with air baffle. 2015. Available 22 november 2022. <https://patents.google.com/patent/ES2537393T3/es>.
35. McCallen, R.; Salari, K.; Ortega, J.; Castellucci, P. et al. DOE's Effort to Reduce Truck Aerodynamic Drag Through Joint Experiments and Computations, SAE Technical Paper 2005. <https://doi.org/10.4271/2005-01-3511>.
36. Sanmiguel Rojas, E. Dispositivo reductor de la resistencia aerodinámica en vehículos. Patente WO2015007942A1. 2015. <https://patents.google.com/patent/WO2015007942A1/es>.
37. Haecheon Choi, Jungil Lee, Hyungmin Park. Aerodynamics of Heavy Vehicles. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 441-468, 46, 1, 10. <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-fluid-011212-140616>.
38. Kurec, K.; Piechna, J. Influence of Side Spoilers on the Aerodynamic Properties of a Sports Car. *Energies* 2019, 12, 4697. <https://doi.org/10.3390/en12244697>.
39. Gao, Wei; Zhaowen, Deng; Feng, Ying; Yuping, H. On Aerodynamic Drag Reduction of Road Vehicles in Platoon, 2022. https://www.researchgate.net/publication/357973943_On_Aerodynamic_Drag_Reduction_of_Road_Vehicles_in_Platoon



40. Le Good, G.; Resnick, M.; Boardman, P.; Clough, B. An Investigation of Aerodynamic Effects of Body Morphing for Passenger Cars in Close-Proximity. *Fluids* 2021, 6, 64. <https://doi.org/10.3390/fluids6020064>.
41. Harinaldi; Budiarmo; Warjito; Kosasih, E.; Rustan, T.; Simanungkalit, Pangihutan, S; Teryanto, L.; Made Fredy, G. Modification of Flow Structure Over a Van Model By Suction Flow Control to Reduce Aerodynamics Drag, *Makara Journal of Technology* 2012, 16, 1, Article 3. <https://doi.org/10.7454/mst.v16i1.1021>.
42. Zhao, Z.; Li, Y.; Zhang, B.; Wang, C.; Yan, Z.; Wang, Q. Design and Analysis of a Novel Adjustable SVAWT for Wind Energy Harvesting in New Energy Vehicle. *World Electric Vehicle Journal*. 2022, 13, 242. <https://doi.org/10.3390/wevj13120242>.
43. Hariram, A.; Koch, T.; Mårdberg, B.; Kyncl, J. A Study in Options to Improve Aerodynamic Profile of Heavy-Duty Vehicles in Europe. *Sustainability* 2019, 11, 5519. <https://doi.org/10.3390/su11195519>.
44. Sivaraj, G., Parammasivam, K. M., Suganya, G. Reduction of Aerodynamic Drag Force for Reducing Fuel Consumption in Road Vehicle using Basebleed, *Journal of Applied Fluid Mechanics* 2018, 11(6), pp. 1489-1495. <http://dx.doi.org/10.29252/jafm.11.06.29115>.
45. Sivaraj, G.; Parammasivam, K.M.; Suganya, G. Reduction of Aerodynamic Drag Force for Reducing Fuel Consumption in Road Vehicle using Basebleed, *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2018, 11, 1489–1495. Available online: https://www.jafmonline.net/article_699_7aa2d948d338b1da8d2a2b1ae9d693f6.pdf (accessed on 1 November 2022).
46. Sivaraj, G.; Raj, M.G. Optimum way to increase the fuel efficiency of the car using base bleed. *International Journal of Modern Engineering Research*. 2012, 2, 1189–1194. Available online: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16934356>.
47. Huluka, Alemayehu & Kim, Chul-Ho. Effect of the Air Duct System of a Simplified Vehicle Model on Aerodynamic Performance. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2012, 17. 7985-7995. <http://dx.doi.org/10.15282/ijame.17.2.2020.17.0598>.
48. Soares, Renan. Drag of Road Cars: Cost-effective CFD setup, Proposal of an aerodynamic concept and Case studies, 2015. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3591.1765>.
49. Igali, D.; Mukhmetov, O.; Zhao, Y. Comparative analysis of turbulence models for automotive aerodynamic simulation and design. *International Journal of Automotive Technology*. 2019, 20, 1145–1152. <https://doi.org/10.1007/s12239-019-0107-7>.
50. Kaushik, M. *Theoretical and Experimental Aerodynamics*. Springer 2019. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1678-4>.
51. Doçi, Ilir and Shala, Ferat. Numerical Analysis of the Rear Wind Influence on the Truck During Travel, *Strojnícky časopis. Journal of Mechanical Engineering* 2022, 72, 2, 41-56. <https://doi.org/10.2478/scime-2022-0015>.



52. Bappa, M. Aerodynamic simulation of vehicle bodywork design 2022. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.16171.46884>.
53. Çengel, Y.A.; Cimbala, J.M., Fundamentals of fluid mechanics and applications, Ed. McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 9781259921902. <https://books.google.es/books?id=DqFJvgAACAAJ>.
54. Sadrehighi, Ideen. Numerical Boundary Layer Theory With Case Studies, 2023. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.18230.11848/6>.
55. Ramadhan Mariaprakasam, R.D.; Mat, S.; Mohd Samin, P.; Othman, M.; Ab Wahid, M.; Said, M. Review on Flow Controls for Vehicles Aerodynamic Drag Reduction. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences 2023, 101(1), 11–36. <https://doi.org/10.37934/arfmts.101.1.1136>.
56. Gordon Leishman, J. Introduction to Aerospace Flight Vehicles, 2022. ISBN 979-8-9852614-0-0. <https://doi.org/https://doi.org/10.15394/eaglepub.2022.1066.n13>.
57. Anderson, J. D. Fundamentals of aerodynamics. 5^o Ed. McGraw-Hill, 2011.
58. Barnard, R.H. Road vehicle aerodynamic design: an introduction. 3rd ed. St. Albans Hertfordshire: Mechaero 2009. ISBN: 0-9540734-0-1.
https://archive.org/details/roadvehicleaerod0000barn_p1z1. Accessed April 14 2023.
59. Ahmed, S.; Ramm, G.; Faltin, G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake, SAE Technical Paper 840300, 1984, <https://doi.org/10.4271/840300>.
60. Grandemange, M. Analysis and Control of Three-dimensional Turbulent Wakes: from Axisymmetric Bodies to Road Vehicles, 2013.
61. Mohammed Mohammed, S.; Ali, Mohammed Zayan, J. Drag Reduction For A Fast Back Passenger Car (Logan), Science Heritage Journal, 2017 1(2): 19-22. <http://dx.doi.org/10.26480/gws.02.2017.19.22>.
62. Sebben S.; Sterken L.; Wölken T. Characterization of the rear wake of a SUV with extensions and without extensions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 2017, 231(9): 1294-1302. <http://dx.doi.org/10.1177/0954407016678016>.
63. Lee, S.; Ko, J. A Study on the Influence of Tire Rolling Resistance Coefficient on Vehicle Fuel Consumption and CO₂ Emissions. Transactions of The Korean Society of Automotive Engineers, 2018, 26(3), pp.402-406. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-023-25219-x>.
64. Heinz Heisler. Advanced vehicle technology, 2002. ISBN 0750651318.
65. Barrero Gil, A. Dinámica de osciladores aeroelásticos. Tesis Doctoral, E.T.S.I. Aeronáuticos (UPM), 2008. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.1849>.
66. Desai, S.; Leylek, E.; Lo, C.; Doddegowda, P.; Bychkovsky, A.; George, A.R. Experimental and CFD Comparative Case Studies of Aerodynamics of Race Car Wings, Underbodies with Wheels, and



- Motorcycle Flows; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2008. <https://doi.org/10.4271/2008-01-2997>.
67. Selva Kumar, K.; Parammasivam, K. Computational and Experimental Investigations on Aerodynamic Characteristics of a Hatchback model Car Using Base Bleed Academic Discipline And Sub-Disciplines subject classification type (method/approach) CFD Analysis and Wind Tunnel Experiment with scaled model of car. ISSN 2321-807X. Journal of advances in chemistry, 2017. Volumen 13, N4. 6151.
 68. Filgueiras, E.; Pereira, D.B. Physical and Virtual Wind Tunnels: Automobile Design Approach. In: Rebelo, F. (eds) Advances in Ergonomics in Design. AHFE 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 261. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79760-7_92.
 69. Ljungskog, E.; Sebben, S.; Broniewicz, A. Inclusion of the physical wind tunnel in vehicle CFD simulations for improved prediction quality. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2020, 197. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104055>
 70. Urquhart, M.; Varney, M.; Sebben, S.; Passmore, M. Drag reduction mechanisms on a generic square-back vehicle using an optimised yaw-insensitive base cavity. Exp. Fluids 2021, 62, 241. <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03334-0>.
 71. Howell, J.; Windsor, S.; Passmore, M. Some Observations on Shape Factors Influencing Aerodynamic Lift on Passenger Cars. Fluids 2021, 6, 44. <https://doi.org/10.3390/fluids6010044>.
 72. Cerutti, J.J.; Sardu, C.; Cafiero, G.; Iuso, G. Active Flow Control on a Square-Back Road Vehicle. Fluids 2020, 5, 55. <https://doi.org/10.3390/fluids5020055>.
 73. Littlewood, R.P.; Passmore, M.A. Aerodynamic drag reduction of a simplified squareback vehicle using steady blowing. Exp. Fluids 2012, 53, 519-529. <https://doi.org/10.1007/s00348-012-1306-4>.
 74. Wang, H.; Liu, X.; Chen, T.; Xu, S. Prediction and evaluation of fatigue life via modified energy method considering surface processing. Int. J. Damage Mech. 2021, 31, 105678952110451. <https://doi.org/10.1177/10567895211045120>.
 75. Yang, X.B.; Liu, X.T.; Tong, J.C.; Wang, Y.S.; Wang, X.L. Research on Load Spectrum Construction of Bench Test Based on Automotive Proving Ground. J. Test. Eval. 2018, 46, 1099–1110. <https://doi.org/10.1520/JTE20170201>.
 76. Ataei, M.; Tang, C.; Khajepour, A.; Jeon, S. Active camber system for lateral stability improvement of urban vehicles. Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng. 2019, 233, 3824–3838. <https://doi.org/10.1177/0954407019832436>.
 77. Ministerio del Interior. BOE-A-2015-11722. Publicado en «BOE» núm. 261, de 31/10/2015. Entrada en vigor: 31/01/2016.
 78. Saleh, Z. M., Ali, A. H. and Abood, M. S. Drag Reduction Using Passive Methods on KIA PRIDE Car Model, Journal of Engineering, 26(4), pp. 47–63, 2020. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2020.04.04>.



79. M. Lorite-Díez, J.I. Jiménez-González, L. Pastur, O. Cadot, C. Martínez-Bazán, Drag reduction on a three-dimensional blunt body with different rear cavities under cross-wind conditions, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 200, 2020, 104145, ISSN 0167-6105, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104145>.
80. Schuetz, T.C. *Aerodynamics of Road Vehicles*; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2016.
81. Katz, J. *Automotive Aerodynamics*; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2016.
82. Richmond-Navarro, G., Fallas-Hernández, E., Padilla-Barrientos, J. A., & Jiménez-Ceciliano, M. (2022). Principales túneles de viento en la investigación sobre energía eólica alrededor del mundo. *Revista Tecnología En Marcha*, 35(3), Pág. 178–194. <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5711>.
83. Bruno Chanetz. A century of wind tunnels since Eiffel. *Comptes Rendus Mécanique*. Volume 345, Issue 8, 2017. Pages 581-594, ISSN 1631-0721. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2017.05.012>.
84. Cornejo Luna, O., Mogollón, L., & Alvarez, H. (2019). Diseño preliminar parte I, de un túnel de viento de circuito abierto (tipo Eiffel) para números de Reynolds de 3.3×10^6 m⁻¹. *I+D Tecnológico*, 15(1), 5-16. <https://doi.org/10.33412/idt.v15.1.2091>.
85. Ahmed, Noor A.; Bansal, Ram; Sharma, R. B. Drag Reduction of Passenger Car Using Add-On Devices. *JOUR.* 678518. 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/678518>.
86. Sebben S, Sterken L, Wölken T. Characterization of the rear wake of a SUV with extensions and without extensions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2017;231(9):1294-1302. <https://doi.org/10.1177/0954407016678016>.
87. Santos, A & bernhard de souza, Davi & Costa, F & Farias, Maria & Massari, P & Araújo, S & Zanirath, Yoná. (2016). Effects of screens set characteristics on the flow field in a wind tunnel. *Journal of Physics: Conference Series*. 733. 012001. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/733/1/012001>.
88. Morales Contreras, O. A.; Paz González, J. A.; Paz González, M. L., Sumbarda Ramos, E. G., & Arciniega Martínez, J. (2021). Honeycomb insertion in FCITEC wind tunnel. *REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS*, 4(3), 187–194. <https://doi.org/10.37636/recit.v43187194>.
89. Lumley, J. L., and McMahon, J. F. Reducing Water Tunnel Turbulence by Means of a Honeycomb. *ASME. J. Basic Eng.* 1967; 89(4): 764–770. <https://doi.org/10.1115/1.3609700>.
90. Ismail, Erlanda Augupta Pane, Reza Abdu Rahman. An open design for a low-cost open-loop subsonic wind tunnel for aerodynamic measurement and characterization, *HardwareX*, Volume 12, 2022, e00352, ISSN 2468-0672. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00352>.
91. Franco Martínez, D.; Ramires-Silva, P. Construcción de un túnel de viento. *Revista de Innovación Sistemática* 2017. Vol.1-1:55-71. ISSN 2523-6784. https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Innovacion_Sistemática/vol1num1/Revista_de_Innovacion_Sistem%C3%A1tica_V1_N1_6.pdf.



92. Fernández Gutiérrez, J.; Fernández-Arias, P.; Vergara, D.; Antón Sancho, A. An Original Aerodynamic Ducting System to Improve Energy Efficiency in the Automotive Industry. *Inventions*, 2023, 8(1):13. <https://doi.org/10.3390/inventions8010013>.
93. Fogaça Truyts, C.; Collucci da Costa Reis, M.L. Dynamic measurement applied to anemometer verification, *Measurement*. Volume 204, 2022. 112039. ISSN 0263-2241. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112039>.
94. MOTT, ROBERT L. MECÁNICA DE FLUIDOS, Sexta edición. PEARSON EDUCACIÓN, México, 2006. Arca: Ingeniería. ISBN: 970-26-0805-8.
95. Zhiqiang Sun, Zhiyong Li and Jianwu Zheng, Influence of improper installation on measurement performance of Pitot tube, 2009 International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, Chengdu, 2009, pp. 53-56. <http://dx.doi.org/10.1109/ICIMA.2009.5156558>.
96. ISO. Measurement of fluid flow in closed conduits — Velocity area method using Pitot static tubes. Technical Committee: ISO/TC 30/SC 5 Velocity and mass methods. ICS: 17.120.10 Flow in closed conduits. Edition: 3. Publication date: 2020-07. <https://www.iso.org/standard/75508.html>.
97. Elofsson, P.; Bannister, M., Drag Reduction Mechanisms Due to Moving Ground and Wheel Rotation in Passenger Cars. SAE Technical Paper 2002-01-0531, 2002. <https://doi.org/10.4271/2002-01-0531>.
98. Gómez Gómez, E. L.; Parra Villamarin, J. E.; Reyes Caballero, D. A.; Galindo, J.; Zuluaga, E. Implementación de sistema para la medición de fuerzas aerodinámicas en un túnel de viento subsónico. *Ciencia Y Poder Aéreo*, 13(1), 106–113, 2018. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.590>.
99. Gaur, Himalaya; Dhakad, O.; Aggarwal, Prerit; Goyal, P. Flow Analysis and Pressure Distribution on Car Model Using Wind Tunnel, 2017. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.31904.33283>.
100. Tarakka, R. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2021, 1173 012045. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1173/1/012045>.
101. Moreo, G., Meroniuc, M.; Ruscio, J.; Domecq, B. Diseño de Sistema de Posicionamiento de Sondas en Túnel de Viento. *Revista Tecnología Y Ciencia*, 2019, (35), 18–40. <https://doi.org/10.33414/rtyc.35.18-40.2019>.
102. Aguirre, M.A.; Astiz, V.; Helios, M.; Ferrandez, M.; Meroniuc, M. Desarrollo de Balanza Externa Para Túnel de Viento. *Revista de Tecnología y Ciencia UTN*, 2016. https://www.researchgate.net/publication/315692582_Desarrollo_de_Balanza_Externa_Para_Tunel_de_Viento.
103. Zahariea, D. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 12 012114, 2021. DOI 10.1088/1755-1315/12/1/012114. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/12/1/012114>.
104. Khalighi, B.; Zhang, S.; Koromilas, C.; Balkanyi, S. et al., Experimental and Computational Study of Unsteady Wake Flow Behind a Bluff Body with a Drag Reduction Device, SAE Technical Paper 2001-01-1042, 2001, <https://doi.org/10.4271/2001-01-1042>.



105. Brown, Y.A.; Windsor, S.; Gaylard, A. The Effect of Base Bleed and Rear Cavities on the Drag of an SUV; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2010. <https://doi.org/10.4271/2010-01-0512>.
106. Al-Saadi, A.; Al-Farhany, K.; Faisal, A.E.; Azeez, M.; Jamshed, W.; Eid, M.R.; Tag, E.S.M.; Ampjad, A. Improvement of the aerodynamic behaviour of the passenger car by using a combine of ditch and base bleed. *Sci. Rep.* 2022, 12, 18462. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23183-z>.
107. Zhang, D.; Ivanco, A.; Filipi, Z. Model-Based Estimation of Vehicle Aerodynamic Drag and Rolling Resistance. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 2015, 8. <http://dx.doi.org/10.4271/2015-01-2776>.
108. Lee, S.; Ko, Jongmin. A Study on the Influence of Tire Rolling Resistance Coefficient on Vehicle Fuel Consumption and CO₂ Emissions. *Transactions of The Korean Society of Automotive Engineers* 2018, Vol. 26, No. 3, pp. 402-406. <https://doi.org/10.7467/KSAE.2018.26.3.402>.
109. Wismer, R.D.; Luth, H.J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *Trans. ASAE* 1974, 17, 8–10. <https://doi.org/10.13031/2013.36772>.
110. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Informe anual de precios de carburantes y combustibles 2022. <https://energia.gob.es/petroleo/Informes/InformesAnuales/InformesAnuales/Precios%20Carburantes.%20Comparaci%C3%B3n%202021-2022.pdf>.
111. Narayan, P. Oil price news and COVID-19—Is there any connection? *Energy Research Letters*. 2020, 1. <https://doi.org/10.46557/001c.13176>.
112. Martins, F.; Felgueiras, C.; Smitkova, M.; Caetano, N. Analysis of Fossil Fuel Energy Consumption and Environmental Impacts in European Countries. *Energies* 2019, 12, 964. <https://doi.org/10.3390/en12060964>.



Anexos

En este apartado se encuentran 3 Anexos. En el Anexo A se muestra una tabla que registra la nomenclatura de cada uno de los 378 puntos de medición. En el Anexo B se muestran las fichas técnicas de los principales equipos e instrumentos utilizados para el desarrollo y ejecución de los diversos ensayos empíricos. En el Anexo C se incluye un artículo fruto de la investigación desarrollada en esta Tesis Doctoral, que ha sido publicado en una revista de impacto.

Anexo A. Nomenclatura puntos de medición.

Punto medición	Plano X	Plano Y	Plano Z	Velocidad (km/h)
A-1-36	1	95	100	36
A-1-42	1	95	100	42
A-1-52	1	95	100	52
A-1-62	1	95	100	65
A-1-71	1	95	100	74
A-1-76	1	95	100	76
A-5-36	5	95	100	36
A-5-42	5	95	100	42
A-5-52	5	95	100	52
A-5-62	5	95	100	65
A-5-71	5	95	100	74
A-5-76	5	95	100	76
A-10-36	10	95	100	36
A-10-42	10	95	100	42
A-10-52	10	95	100	52
A-10-62	10	95	100	65
A-10-71	10	95	100	74
A-10-76	10	95	100	76
A-20-36	20	95	100	36
A-20-42	20	95	100	42
A-20-52	20	95	100	52
A-20-62	20	95	100	65
A-20-71	20	95	100	74
A-20-76	20	95	100	76
A-30-36	30	95	100	36



A-30-42	30	95	100	42
A-30-52	30	95	100	52
A-30-62	30	95	100	65
A-30-71	30	95	100	74
A-30-76	30	95	100	76
A-40-36	40	95	100	36
A-40-42	40	95	100	42
A-40-52	40	95	100	52
A-40-62	40	95	100	65
A-40-71	40	95	100	74
A-40-76	40	95	100	76
A-50-36	50	95	100	36
A-50-42	50	95	100	42
A-50-52	50	95	100	52
A-50-62	50	95	100	65
A-50-71	50	95	100	74
A-50-76	50	95	100	76
B-1-36	1	95	60	36
B-1-42	1	95	60	42
B-1-52	1	95	60	52
B-1-62	1	95	60	65
B-1-71	1	95	60	74
B-1-76	1	95	60	76
B-5-36	5	95	60	36
B-5-42	5	95	60	42
B-5-52	5	95	60	52
B-5-62	5	95	60	65
B-5-71	5	95	60	74
B-5-76	5	95	60	76
B-10-36	10	95	60	36
B-10-42	10	95	60	42
B-10-52	10	95	60	52
B-10-62	10	95	60	65



B-10-71	10	95	60	74
B-10-76	10	95	60	76
B-20-36	20	95	60	36
B-20-42	20	95	60	42
B-20-52	20	95	60	52
B-20-62	20	95	60	65
B-20-71	20	95	60	74
B-20-76	20	95	60	76
B-30-36	30	95	60	36
B-30-42	30	95	60	42
B-30-52	30	95	60	52
B-30-62	30	95	60	65
B-30-71	30	95	60	74
B-30-76	30	95	60	76
B-40-36	40	95	60	36
B-40-42	40	95	60	42
B-40-52	40	95	60	52
B-40-62	40	95	60	65
B-40-71	40	95	60	74
B-40-76	40	95	60	76
B-50-36	50	95	60	36
B-50-42	50	95	60	42
B-50-52	50	95	60	52
B-50-62	50	95	60	65
B-50-71	50	95	60	74
B-50-76	50	95	60	76
C-1-36	1	95	20	36
C-1-42	1	95	20	42
C-1-52	1	95	20	52
C-1-62	1	95	20	65
C-1-71	1	95	20	74
C-1-76	1	95	20	76
C-5-36	5	95	20	36



C-5-42	5	95	20	42
C-5-52	5	95	20	52
C-5-62	5	95	20	65
C-5-71	5	95	20	74
C-5-76	5	95	20	76
C-10-36	10	95	20	36
C-10-42	10	95	20	42
C-10-52	10	95	20	52
C-10-62	10	95	20	65
C-10-71	10	95	20	74
C-10-76	10	95	20	76
C-20-36	20	95	20	36
C-20-42	20	95	20	42
C-20-52	20	95	20	52
C-20-62	20	95	20	65
C-20-71	20	95	20	74
C-20-76	20	95	20	76
C-30-36	30	95	20	36
C-30-42	30	95	20	42
C-30-52	30	95	20	52
C-30-62	30	95	20	65
C-30-71	30	95	20	74
C-30-76	30	95	20	76
C-40-36	40	95	20	36
C-40-42	40	95	20	42
C-40-52	40	95	20	52
C-40-62	40	95	20	65
C-40-71	40	95	20	74
C-40-76	40	95	20	76
C-50-36	50	95	20	36
C-50-42	50	95	20	42
C-50-52	50	95	20	52
C-50-62	50	95	20	65



C-50-71	50	95	20	74
C-50-76	50	95	20	76
D-1-36	1	65	100	36
D-1-42	1	65	100	42
D-1-52	1	65	100	52
D-1-62	1	65	100	65
D-1-71	1	65	100	74
D-1-76	1	65	100	76
D-5-36	5	65	100	36
D-5-42	5	65	100	42
D-5-52	5	65	100	52
D-5-62	5	65	100	65
D-5-71	5	65	100	74
D-5-76	5	65	100	76
D-10-36	10	65	100	36
D-10-42	10	65	100	42
D-10-52	10	65	100	52
D-10-62	10	65	100	65
D-10-71	10	65	100	74
D-10-76	10	65	100	76
D-20-36	20	65	100	36
D-20-42	20	65	100	42
D-20-52	20	65	100	52
D-20-62	20	65	100	65
D-20-71	20	65	100	74
D-20-76	20	65	100	76
D-30-36	30	65	100	36
D-30-42	30	65	100	42
D-30-52	30	65	100	52
D-30-62	30	65	100	65
D-30-71	30	65	100	74
D-30-76	30	65	100	76
D-40-36	40	65	100	36



D-40-42	40	65	100	42
D-40-52	40	65	100	52
D-40-62	40	65	100	65
D-40-71	40	65	100	74
D-40-76	40	65	100	76
D-50-36	50	65	100	36
D-50-42	50	65	100	42
D-50-52	50	65	100	52
D-50-62	50	65	100	65
D-50-71	50	65	100	74
D-50-76	50	65	100	76
E-1-36	1	65	60	36
E-1-42	1	65	60	42
E-1-52	1	65	60	52
E-1-62	1	65	60	65
E-1-71	1	65	60	74
E-1-76	1	65	60	76
E-5-36	5	65	60	36
E-5-42	5	65	60	42
E-5-52	5	65	60	52
E-5-62	5	65	60	65
E-5-71	5	65	60	74
E-5-76	5	65	60	76
E-10-36	10	65	60	36
E-10-42	10	65	60	42
E-10-52	10	65	60	52
E-10-62	10	65	60	65
E-10-71	10	65	60	74
E-10-76	10	65	60	76
E-20-36	20	65	60	36
E-20-42	20	65	60	42
E-20-52	20	65	60	52
E-20-62	20	65	60	65



E-20-71	20	65	60	74
E-20-76	20	65	60	76
E-30-36	30	65	60	36
E-30-42	30	65	60	42
E-30-52	30	65	60	52
E-30-62	30	65	60	65
E-30-71	30	65	60	74
E-30-76	30	65	60	76
E-40-36	40	65	60	36
E-40-42	40	65	60	42
E-40-52	40	65	60	52
E-40-62	40	65	60	65
E-40-71	40	65	60	74
E-40-76	40	65	60	76
E-50-36	50	65	60	36
E-50-42	50	65	60	42
E-50-52	50	65	60	52
E-50-62	50	65	60	65
E-50-71	50	65	60	74
E-50-76	50	65	60	76
F-1-36	1	65	20	36
F-1-42	1	65	20	42
F-1-52	1	65	20	52
F-1-62	1	65	20	65
F-1-71	1	65	20	74
F-1-76	1	65	20	76
F-5-36	5	65	20	36
F-5-42	5	65	20	42
F-5-52	5	65	20	52
F-5-62	5	65	20	65
F-5-71	5	65	20	74
F-5-76	5	65	20	76
F-10-36	10	65	20	36



F-10-42	10	65	20	42
F-10-52	10	65	20	52
F-10-62	10	65	20	65
F-10-71	10	65	20	74
F-10-76	10	65	20	76
F-20-36	20	65	20	36
F-20-42	20	65	20	42
F-20-52	20	65	20	52
F-20-62	20	65	20	65
F-20-71	20	65	20	74
F-20-76	20	65	20	76
F-30-36	30	65	20	36
F-30-42	30	65	20	42
F-30-52	30	65	20	52
F-30-62	30	65	20	65
F-30-71	30	65	20	74
F-30-76	30	65	20	76
F-40-36	40	65	20	36
F-40-42	40	65	20	42
F-40-52	40	65	20	52
F-40-62	40	65	20	65
F-40-71	40	65	20	74
F-40-76	40	65	20	76
F-50-36	50	65	20	36
F-50-42	50	65	20	42
F-50-52	50	65	20	52
F-50-62	50	65	20	65
F-50-71	50	65	20	74
F-50-76	50	65	20	76
G-1-36	1	35	100	36
G-1-42	1	35	100	42
G-1-52	1	35	100	52
G-1-62	1	35	100	65



G-1-71	1	35	100	74
G-1-76	1	35	100	76
G-5-36	5	35	100	36
G-5-42	5	35	100	42
G-5-52	5	35	100	52
G-5-62	5	35	100	65
G-5-71	5	35	100	74
G-5-76	5	35	100	76
G-10-36	10	35	100	36
G-10-42	10	35	100	42
G-10-52	10	35	100	52
G-10-62	10	35	100	65
G-10-71	10	35	100	74
G-10-76	10	35	100	76
G-20-36	20	35	100	36
G-20-42	20	35	100	42
G-20-52	20	35	100	52
G-20-62	20	35	100	65
G-20-71	20	35	100	74
G-20-76	20	35	100	76
G-30-36	30	35	100	36
G-30-42	30	35	100	42
G-30-52	30	35	100	52
G-30-62	30	35	100	65
G-30-71	30	35	100	74
G-30-76	30	35	100	76
G-40-36	40	35	100	36
G-40-42	40	35	100	42
G-40-52	40	35	100	52
G-40-62	40	35	100	65
G-40-71	40	35	100	74
G-40-76	40	35	100	76
G-50-36	50	35	100	36



G-50-42	50	35	100	42
G-50-52	50	35	100	52
G-50-62	50	35	100	65
G-50-71	50	35	100	74
G-50-76	50	35	100	76
H-1-36	1	35	60	36
H-1-42	1	35	60	42
H-1-52	1	35	60	52
H-1-62	1	35	60	65
H-1-71	1	35	60	74
H-1-76	1	35	60	76
H-5-36	5	35	60	36
H-5-42	5	35	60	42
H-5-52	5	35	60	52
H-5-62	5	35	60	65
H-5-71	5	35	60	74
H-5-76	5	35	60	76
H-10-36	10	35	60	36
H-10-42	10	35	60	42
H-10-52	10	35	60	52
H-10-62	10	35	60	65
H-10-71	10	35	60	74
H-10-76	10	35	60	76
H-20-36	20	35	60	36
H-20-42	20	35	60	42
H-20-52	20	35	60	52
H-20-62	20	35	60	65
H-20-71	20	35	60	74
H-20-76	20	35	60	76
H-30-36	30	35	60	36
H-30-42	30	35	60	42
H-30-52	30	35	60	52
H-30-62	30	35	60	65



H-30-71	30	35	60	74
H-30-76	30	35	60	76
H-40-36	40	35	60	36
H-40-42	40	35	60	42
H-40-52	40	35	60	52
H-40-62	40	35	60	65
H-40-71	40	35	60	74
H-40-76	40	35	60	76
H-50-36	50	35	60	36
H-50-42	50	35	60	42
H-50-52	50	35	60	52
H-50-62	50	35	60	65
H-50-71	50	35	60	74
H-50-76	50	35	60	76
I-1-36	1	35	20	36
I-1-42	1	35	20	42
I-1-52	1	35	20	52
I-1-62	1	35	20	65
I-1-71	1	35	20	74
I-1-76	1	35	20	76
I-5-36	5	35	20	36
I-5-42	5	35	20	42
I-5-52	5	35	20	52
I-5-62	5	35	20	65
I-5-71	5	35	20	74
I-5-76	5	35	20	76
I-10-36	10	35	20	36
I-10-42	10	35	20	42
I-10-52	10	35	20	52
I-10-62	10	35	20	65
I-10-71	10	35	20	74
I-10-76	10	35	20	76
I-20-36	20	35	20	36



I-20-42	20	35	20	42
I-20-52	20	35	20	52
I-20-62	20	35	20	65
I-20-71	20	35	20	74
I-20-76	20	35	20	76
I-30-36	30	35	20	36
I-30-42	30	35	20	42
I-30-52	30	35	20	52
I-30-62	30	35	20	65
I-30-71	30	35	20	74
I-30-76	30	35	20	76
I-40-36	40	35	20	36
I-40-42	40	35	20	42
I-40-52	40	35	20	52
I-40-62	40	35	20	65
I-40-71	40	35	20	74
I-40-76	40	35	20	76
I-50-36	50	35	20	36
I-50-42	50	35	20	42
I-50-52	50	35	20	52
I-50-62	50	35	20	65
I-50-71	50	35	20	74
I-50-76	50	35	20	76



Anexo B

Anexo B.1. Cascos de protección auditiva.

Modelo de protección auditiva empleado

Orejeiras 3M™ PELTOR™ Optime™ III

Las orejeiras 3M™ PELTOR™ Optime™ III son un protector auditivo de alto rendimiento desarrollado para entornos extremadamente ruidosos. La protección se basa en una tecnología con doble carcasa que minimiza la resonancia en la carcasa interior para atenuar al máximo las altas frecuencias.

Las almohadillas son amplias y están rellenas de espuma de plástico blando para ofrecer el mejor ajuste y la menor presión de contacto posibles. Las orejeiras 3M™ PELTOR™ Optime™ III son sinónimo de una protección eficaz y gran comodidad para el usuario.



Datos de atenuación:

3M™ OREJERAS PELTOR™ OPTIME™ III H540P3*

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Atenuación media (dB)	17,1	24,5	34,8	40,2	39,6	46,7	43,1
Desviación típica (dB)	2,3	2,8	2,2	2,0	1,8	4,2	2,5
Protección asumida (dB)	14,8	21,7	32,6	38,2	37,8	42,5	40,6

SNR = 34 dB, H = 40 dB, M = 32 dB, L = 22 dB

Respecto a las normativas de ruido, la Directiva Europea de Agentes Físicos (Ruido) 2003/10/CE está concebida para asegurarse de que los empleados estén protegidos de peligros físicos (no de químicos).

La pérdida de la audición es uno de los accidentes laborales más comunes y, a pesar de haber conseguido una reducción significativa de las cifras gracias a la legislación anterior, este problema sigue representando altos costes para las empresas y afectando de manera desafortunada a muchos trabajadores, incluso después de su jubilación. La pérdida de la audición inducida por el ruido es totalmente evitable con una amplia variedad de técnicas entre las que se incluyen la evaluación de procesos, los controles de ingeniería y el uso de protectores auditivos.



Anexo B.2. Tacómetro.



PHOTO/CONTACT TACHOMETER
Model : DT-2238

FEATURES		
* World's patent, Multi-functions, one instrument TACH. (RPM, m/min., ft/min.).		
* Wide measuring range from 0.5 to 100,000 RPM.		
* 0.1 RPM resolution for the measured value < 1000 RPM.		
* The last value, max., value, min. value will be stored into the memory automatically & can be obtained by pressing Memory Call Button.		
* High visible LCD display gives RPM reading exactly with no guessing or errors & saves battery energy.		
* This tachometer used the exclusive one chip MICRO-COMPUTER LSI circuit & crystal time base, offer the high accurate measurement & fast sampling time.		
* The use of durable, long lasting components, including a strong, light weight ABS plastic housing, assures almost maintenance free performance for many years.		
* The housing cabinet has been carefully shaped to fit comfortable in either hand.		
SPECIFICATIONS		
Display	5 digits, 10 mm(0.4") LCD(Liquid Crystal Display), with function annunciation.	
Measurement & Range	PHOTO TACH. : 5 to 99,999 RPM.	
	CONTACT TACH. : 0.5 to 19,999 RPM.	
Resolution	SURFACE SPEED (m/min.) :	
	m/min.- 0.05 to 1,999.9 m/min.	
	ft/min.- 0.2 to 6,560 ft/min.	
	RPM	0.1 RPM (< 1,000 RPM). 1 RPM (≥ 1000 RPM).
Accuracy	m/min.	0.01 m/min (< 100 m/min.) 0.1 m/min (≥ 100 m/min.)
	ft/min.	0.1 ft/min. (< 1,000 ft/min.) 1 ft/min. (≥ 1,000 ft/min.)
	RPM : ± (0.05% + 1 digit). Surface speed : ± (2% + 1 digit) <i>* If the circumference size of the surface test wheel is 10 cm exactly.</i>	
Time base	Quartz crystal, 4.194 MHz.	
Circuit	Exclusive one-chip of microcomputer LSI circuit.	
Operating Temp.	0- 50 °C (32 - 122 °F).	
Operating Humidity	Less than 80% R.H.	
Memory	Last, Max. & Min. value.	
Battery	4 x 1.5V AA (UM-3) battery.	
Power Consumption	Photo type	Approx. DC 153 mA.
	Contact type	Approx. DC 10 mA.
Size	195 x 61 x 38.5 mm (7.6 x 2.4 x 1.5 inch)	
Weight	280g (0.61 LB)/including battery.	



Anexo B.3. Multímetro.

Características técnicas	
Marca	Fluke
Modelo	43B
Tipo	Analizador, osciloscopio



Funciones eléctricas

Las especificaciones son válidas para señales con un fundamental de entre 40 Hz y 70 Hz.

Tensión mínima de entrada..... 4 V pico a pico
Corriente mínima de entrada..... 10 A pico a pico (1 mV/A)
Ancho de banda de entrada..... DC a 15 kHz (salvo que se especifique lo contrario)

Voltios / Amperios / Hz

Lecturas..... V rms (AC+DC), A rms (AC+DC), Hz
Rangos de tensión (auto) 5.000 V a 500.0 V, 1250 V
±(1% + 10 cuentas)
Rangos de corriente (auto)..... 50.00 A a 500.0 kA, 1250 kA
±(1% + 10 cuentas)
Rango de frecuencia 10,0 Hz a 15,0 kHz
40,0 a 70,0 Hz ±(0,5% + 2 cuentas)
Rango de frecuencia de cresta CF 1.0 a 10.0 ±(5 % + 1 cuenta)

Potencia

(Monofásica y trifásica, cargas equilibradas de tres conductores)

Lecturas..... Vat, VA, VAR, PF, DPF, Hz
Rangos de Vat, VA, VAR (auto) 250 W a 250 MW, 625 MW, 1,56 GW
al seleccionar: total (%rms): ±(2 % + 6 cuentas)
al seleccionar: fundamental (%fundamen.): ±(4% + 4 cuentas)
DPF 0,00 a 1,00,
0,00 a 0,25 no se especifica
0,25 a 0,90 ± 0,04
0,90 a 1,00 ± 0,03
PF 0,00 a 1,00,
± 0,04
Rango de frecuencia 10,0 Hz a 15,0 kHz
40,0 a 70,0 Hz ±(0,5% + 2 cuentas)

Armónicos

Número de armónicos DC..21, DC..33, DC..51

Lecturas / lecturas del cursor

V rms / I rms fundamen. ±(3% + 2 cuentas)
33st ±(5% + 3 cuentas), 51st ±(15% + 5 cuentas)
Watt fundamen. ±(5% + 10 cuentas)
33st ±(10% + 10 cuentas), 51st ±(30% + 5 cuentas)
Frecuencia de fundamental ± 0,25 Hz



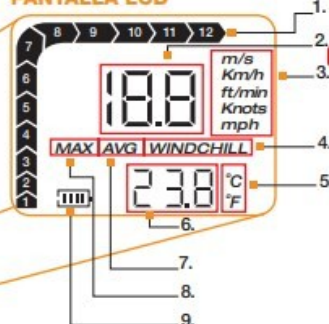
Anexo B.4. Anemómetro digital

CARACTERÍSTICAS

- ▶ Medida de velocidad del viento: Seleccione Actual (Ac), Máxima (MÁX.) o Media (MED).
- ▶ Temperatura con lectura de termómetro incorporado en °F (Fahrenheit) o °C (Celsius).
- ▶ Indicación de frío del viento.
- ▶ Cinco opciones para las unidades de medida del viento: m/s (metros por segundo), km/h (kilómetros por hora), pies/min (pies por minuto), nudos, mph (millas por hora). Las conversiones métricas del viento para compararlas entre unidades se encuentran fácilmente disponibles en Internet.
- ▶ Escala de Beaufort para la intensidad del viento: Los números de esta escala van del 0 al 12 y son medidas para describir la velocidad del viento basada en las observaciones del estado del mar. Podrá consultar más información en Internet.
- ▶ Apagado manual y automático
- ▶ Indicación de batería baja
- ▶ Correa incluida
- ▶ Retroiluminación: Indicación de la pantalla LCD en azul
- ▶ Funda de protección de goma
- ▶ Resistente a la intemperie



PANTALLA LCD



1. Escala de Beaufort
2. Velocidad del viento
3. Unidades de velocidad del viento
4. Icono del frío del viento
5. Unidad de temperatura (°F o °C)
6. Lectura de temperatura
7. Medida de velocidad MED
8. Medida de velocidad MÁX.
9. Batería restante

FUNCIONAMIENTO

- ▶ **Encendido:** Pulse el botón "Modo" durante dos segundos para encender el dispositivo. La pantalla LCD mostrará la velocidad del viento, temperatura y nivel de batería.
- ▶ **Configurar la unidad de velocidad del viento:** Pulse el botón "Modo" durante tres segundos hasta que "m/s" comience a parpadear. Pulse el botón "Configurar" para navegar por las opciones y pulse el botón "Modo" para confirmar su elección. La configuración se almacenará en el dispositivo incluso después de apagarlo.
- ▶ **Apagado:** Pulse los botones "Modo" y "Configurar" al mismo tiempo durante un segundo para apagar el dispositivo.
- ▶ **Configurar la medida de velocidad del viento:** Después de apagar el dispositivo, vuelva a encenderlo y pulse el botón "Modo" durante unos tres segundos hasta que "m/s" comience a parpadear. Pulse el botón "Configurar" para navegar por las unidades de velocidad del viento y por las opciones de medida de velocidad del viento: "Ac" para la velocidad actual del viento, "MÁX." para la velocidad máxima del viento y "MED" para la velocidad media del viento. Pulse el botón "Modo" para confirmar su elección. La configuración se almacenará en el dispositivo incluso después de apagarlo. La velocidad MÁX. del viento indicará la velocidad más alta del viento almacenada una vez que se ajuste a menos que reajuste otra unidad de medida. La velocidad MED del viento indicará los ocho últimos períodos de muestra o cuatro segundos de media de actividad.
- ▶ **Indicación del viento en la pantalla LCD:** Cuando gira el impulsor (ventilador/veleta), la pantalla LCD indicará de inmediato la velocidad del viento y temperatura según la configuración que eligió además de la escala de Beaufort.
- ▶ **Configurar la unidad de temperatura:** En la parte trasera de la unidad se encuentra un botón oculto con el símbolo de "C/F" debajo. Utilice un alfiler pequeño (u otro objeto fino) para pulsar el botón y cambiar la lectura de la temperatura en "C" o "F".
- ▶ **Frío del viento:** Cuando la temperatura cae por debajo de los 32° F (0° C), el icono del viento "FRÍO DEL VIENTO" aparecerá en la pantalla LCD.
- ▶ **Indicación de retroiluminación:** Pulse algún botón para activar la retroiluminación. Permanecerá encendida diez segundos aproximadamente.
- ▶ **Apagado automático:** La unidad se apagará automáticamente si no se encuentra en funcionamiento durante 14 minutos.
- ▶ **Cambio de batería:** Cuando el icono de la batería " " aparezca en la pantalla, sustituya la batería. Gire la cubierta del compartimento de la batería con una moneda hacia la dirección indicada y utilice un destornillador plano y muy pequeño para quitar la cubierta. Sustituya la batería CR2032 con la posición "+" hacia arriba. Vuelva a colocar la tapa de la batería y ciérrela.

VELOCIDAD DEL VIENTO

UNIDAD	RANGO	RESOLUCIÓN	UMBRAL	PRECISIÓN
m/s	0~30	0.1	0.1	±5%
pies/min	0~5860	19	39	±5%
nudos	0~55	0.2	0.1	±5%
km/h	0~90	0.3	0.3	±5%
mph	0~65	0.2	0.2	±5%

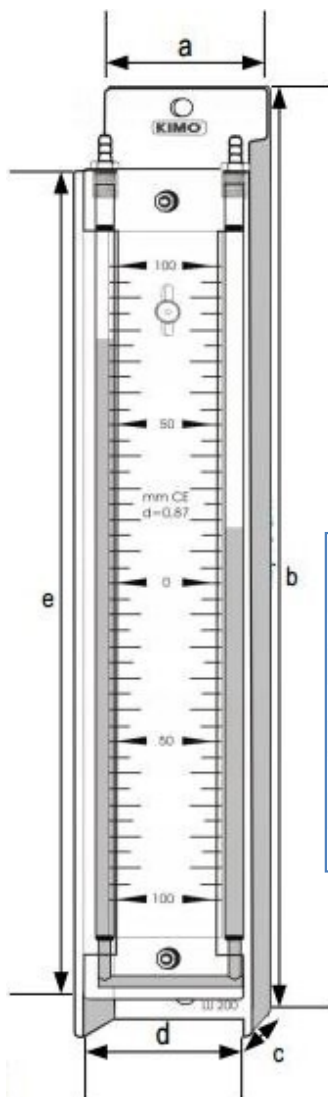


Anexo B.5. Columna de agua por presión.

Características técnicas:

Marca	KIMO
Modelo	LU 400
Tipo	Manómetro de columna vertical
Rango medidas (mmH ₂ O)	200, 0, 200
Resolución medida (mmH ₂ O)	1 mmH ₂ O
Líquido manométrico	AWS 10
Densidad líquido	0,86

Esquema dimensional:



REF.	LU 100	LU 200	LU 400
a	57 mm	57 mm	57 mm
b	207 mm	324 mm	558 mm
c	25 mm	25 mm	25 mm
d	50 mm	50 mm	50 mm
e	169 mm	286 mm	520 mm
Distance between tubes	193 mm	310 mm	544 mm
Weight	260 g	400 g	730 g





Anexo B.6. Rodamientos empleados en maqueta de vehículo.



6200-2RSH

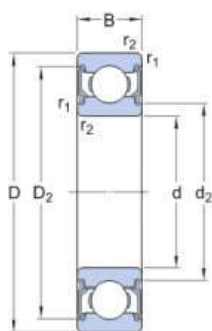


Rodamiento rígido de bolas con sellos

Los rodamientos rígidos de una hilera de bolas con sellos en uno o en ambos lados son especialmente versátiles, tienen una baja fricción y están optimizados para un bajo nivel de ruido y vibraciones, lo que permite alcanzar altas velocidades de giro. Soportan cargas radiales y axiales en ambos sentidos, son fáciles de montar y requieren menos mantenimiento que otros tipos de rodamientos. El sellado integral puede prolongar significativamente la vida útil del rodamiento porque mantiene el lubricante en los rodamientos y los contaminantes fuera.

- El sellado integral prolonga la vida útil del rodamiento
- Diseño sencillo, versátil y robusto
- Baja fricción y capacidad de alta velocidad
- Soportan cargas radiales y axiales en ambos sentidos
- Requieren poco mantenimiento

Dimensiones



d	10 mm	Diámetro del agujero
D	30 mm	Diámetro exterior
B	9 mm	Ancho
d ₂	≈ 15.07 mm	Diámetro del rebaje
D ₂	≈ 24.72 mm	Diámetro del rebaje
r _{1,2}	min. 0.6 mm	Dimensión del chaflán

Rendimiento

Capacidad de carga dinámica básica	5.4 kN
Capacidad de carga estática básica	2.36 kN
Clase de rendimiento SKF	SKF Explorer
Velocidad límite	17 000 r/min

Propiedades

Cantidad de hileras	1
Característica de relubricación	Sin
Disposición ajustada	No
Elemento de fijación, aro exterior del rodamiento	Ninguna
Jaula	Chapa metálica
Juego radial interno	CN



Anexo B.7. Ventilador helicoidal mural de succión.

Marca: EMBPAST

Modelo: A3G 710-AC08

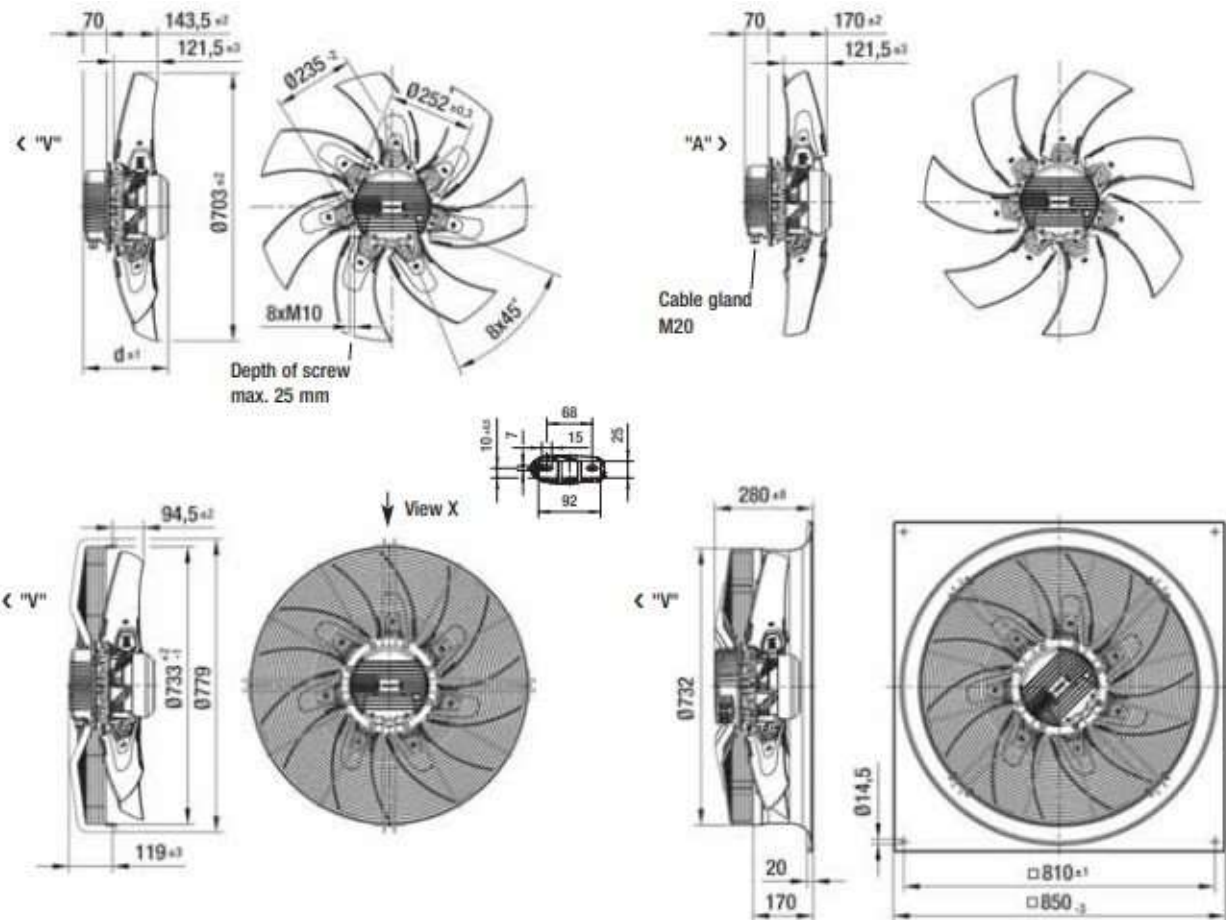
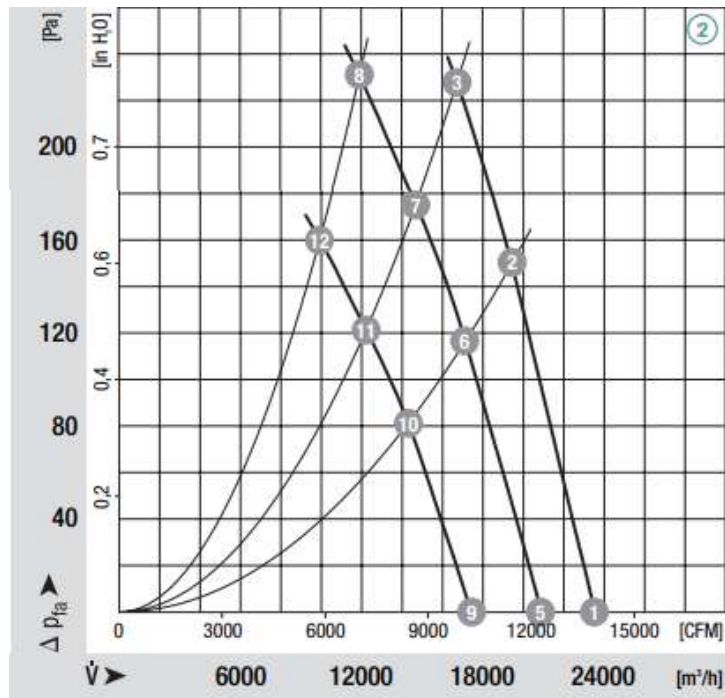
- **Material:** stator and electronics housing made of die-cast aluminium, rotor made of sheet steel (black, KTL coated), impeller blades made of die-cast aluminium
- **Technical features:** control input 0-10 VDC / PWM, RS485 ebmBUS, alarm relay, integrated PID control, voltage supply for sensor, input for sensor 0-10 V respectively 4-20 mA, 0-10 V output for slave, PFC (passive), soft start, line undervoltage detection, phase failure detection, motor current limitation, over-temperature protected electronics and motor, locked-rotor protection
- **Type of protection:** IP 54 according to DIN VDE 0470, part 1 (EN 60 529) category 2
- **Insulation class:** "F"
- **Approvals:** UL, CE and GOST; with 380-480 VAC with VDE; CCC is planned

Nominal data ⁽¹⁾		Characteristic	Nominal voltage range	Frequency	Speed/rpm	Max. power input ⁽²⁾	Max. current draw ⁽³⁾	Max. back pressure	Perm. amb. temp.	Mass A3G...	Mass S3G...	Mass W3G...
Type	Motor		VAC	Hz	min ⁻¹	kW	A	Pa	°C	kg	kg	kg
*3G 710	M3G150-IF	①	200-240	50/60	1230	2,60	8,4	230	-25..+60	26,5	33,5	44,5
	M3G150-IF	②	380-480	50/60	1230	2,60	4,5	230	-25..+60	26,5	33,5	44,5

subject to alterations ⁽¹⁾ at 230 resp. 400 VAC ⁽²⁾ in operating point with maximum load

Selection	Cable exit	Direction of air flow	Direction of rotation	Selection			Dimensions
				S/A/B	R/L	d	
*3G 710	S	"V" "A"	R	A3G710-AC12 -13	S3G710-BC12 -13	W3G710-CC12 -13	219,5
			L	A3G710-AC12 -14	---	---	219,5
	S	"V" "A"	R	A3G710-AC08 -03	S3G710-BC08 -03	W3G710-CC08 -03	219,5
			L	A3G710-AC08 -04	---	---	219,5

	n	P ₁	I	Lp _A	η _{HL}		n	P ₁	I	Lp _A	η _{HL}
	[min ⁻¹]	[kW]	[A]	[dBA]	[%]		[min ⁻¹]	[kW]	[A]	[dBA]	[%]
② ①	1230	2,13	3,3	79	75	② ⑨	900	0,87	1,5	72	75
② ②	1230	2,49	3,9	79	71	② ⑩	900	1,02	1,8	72	71
② ③	1230	2,59	4,0	79	65	② ⑪	900	1,06	1,8	72	65
② ④	---	---	---	---	---	② ⑫	900	1,09	1,9	72	57
② ⑤	1080	1,46	2,4	77	75						
② ⑥	1080	1,71	2,7	76	71						
② ⑦	1080	1,77	2,8	76	65						
② ⑧	1080	1,83	2,9	77	57						





Anexo B.8. Ventilador helicoidal mural de impulsión.



HCH

Ventiladores helicoidales murales o tubulares, versión PL equipados con hélice de plástico y versión AL equipados con hélice de aluminio.

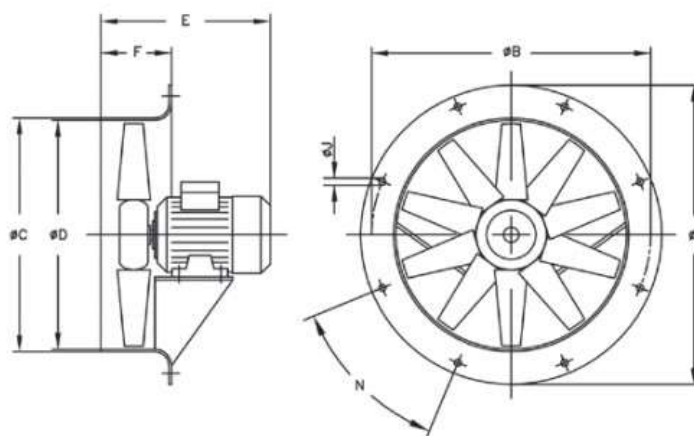
- Monofásicos 230V-50Hz, y trifásicos 230/400V-50Hz(hasta 4kW) y 400/690V-50Hz(potencias superiores a 4kW).
- Temperatura de trabajo : -25°C+ 50°C.

Características técnicas

Modelo	Velocidad (r/min)	Intensidad máx admisible (A)			Potencia instalada (kW)	Caudal máximo (m³/h)	Nivel presión sonora dB(A)	Peso aprox. (Kg)		According ErP	
		230V	400V	690V				HCH	HCT	HCH	HCT
HCH HCT 90-4T-5.5 IE3	1450	13,90	8,00		4,00	41850	89	69	97	2015	2015

Dimensiones mm

HCH



Modelo	ØA	ØB	ØC	ØD	0.16	0.33	0.5	0.75	1	1.5	2	3	4	5.5	7.5	10	15	20	F	ØJ	N
HCH-90-4	1015	970	906	900	-	-	-	-	-	-	-	-	436	430	465	465	-	-	180	12	16x22°30'

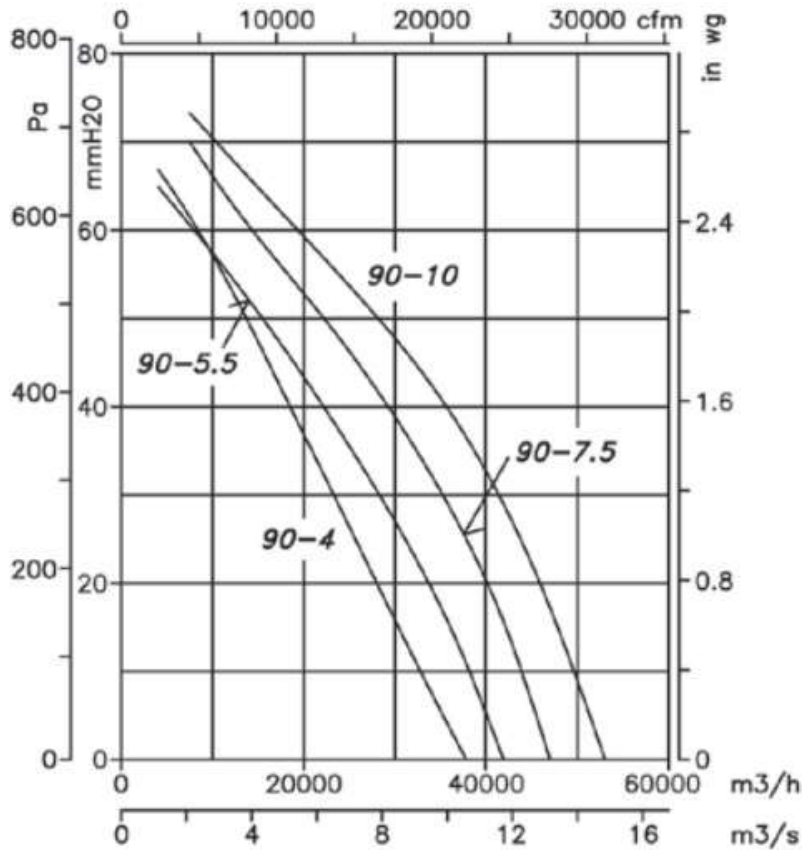
Curvas características

Q= Caudal en m³/h, m³/s y cfm.

Pe= Presión estática en mmH₂O, Pa e inwg.



4 Polos=1500 r/min



Características acústicas

Los valores indicados, se determinan mediante medidas de nivel de presión y potencia sonora en dB(A) obtenidas en campo libre a una distancia equivalente a dos veces la envergadura del ventilador más el diámetro de la hélice, con un mínimo de 1,5 mts.

Espectro de potencia sonora Lw(A) en dB(A) banda de frecuencia en [Hz]

Modelo	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
90-4-5.5	67	88	95	100	103	99	92	81

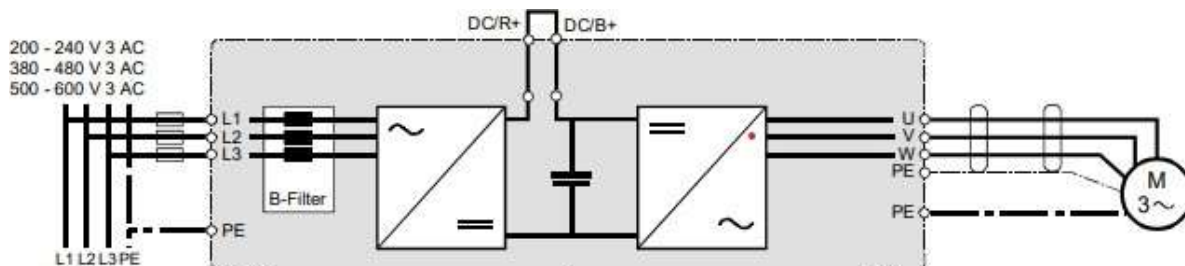


Anexo B.9. Variador de frecuencia.

Marca: SIEMENS

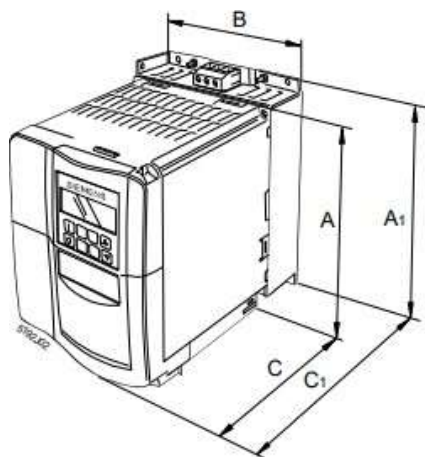
Modelo: SED2-7,5/35B

Esquema eléctrico:



380 V – 480 V, ± 10%, 3 fases											
IP20 Filtrado	IP20 Sin filtrar	IP54 Filtrado	IP54 Sin filtrar	Potencia kW	Frecuencia de impulsos en kHz						
					4	6	8	10	12	14	16
					Corriente de salida máx. en A						
SED2-7.5/32B	SED2-7.5/32X	SED2-7.5/35B	SED2-7.5/35X	7.5	18.4	17.5	16.6	14.7	12.9	11	9.2

Dimensiones:



Tamaños de carcasa B y C

Tamaños de carcasa	Dimensiones				
	A	A ₁	B	C	C ₁
A	173	200	73	149	192.5
B	202	213	149	172	222.5

380 V a 480 V, ± 10%, 3 fases						
Potencia de salida (par variable)	Código IP	Clase de filtro	Corriente de salida máx.	Tamaño de carcasa	Peso	Tipo (ASN)
7.5 10	54	B	18.4	C	21	SED2-7.5/35B



Anexo C. Artigo publicado en una revista de impacto.

Article

An Original Aerodynamic Ducting System to Improve Energy Efficiency in the Automotive Industry

Jana Fernández-Gutiérrez, Pablo Fernández-Arias , Diego Vergara *  and Álvaro Antón-Sancho 

Technology, Instruction and Design in Engineering and Education Research Group, Catholic University of Ávila, C/Canteros s/n, 05005 Ávila, Spain

* Correspondence: diego.vergara@ucavila.es

Abstract: In the automotive industry, the flow of air generates high resistance in the advance of vehicles. In light of this situation, the objective of the present invention is to take advantage of the force of the air itself to help propel vehicles and thus reduce fuel consumption. A channeling system has been designed based on a deflector that collects the air that impacts against the vehicle at the front, transferring it to the rear where it is expelled, allowing the vacuum zone to be filled so that the high pressures of the channeled air are repositioned in the depression zone, significantly increasing the values of the pressures, including those that were previously negative. The deflector has been built and incorporated into a model car so that comparative experimental wind tunnel tests could be carried out to verify that the vacuum in the rear area is eliminated, and positive pressure is obtained.

Keywords: automotive; wind tunnel; air ducting; energy efficiency



Citation: Fernández-Gutiérrez, J.; Fernández-Arias, P.; Vergara, D.; Antón-Sancho, Á. An Original Aerodynamic Ducting System to Improve Energy Efficiency in the Automotive Industry. *Inventions* **2023**, *8*, 13. <https://doi.org/10.3390/inventions8010013>

Academic Editor: Shyy Woei Chang

Received: 30 November 2022

Revised: 29 December 2022

Accepted: 3 January 2023

Published: 6 January 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

By 2030, the global car fleet will grow from 800 million to 1.6 billion vehicles [1]. This doubling of the global car fleet requires a radical technological change to ensure long-term sustainable mobility in line with the goal of eliminating carbon emissions from transport. The strategy should therefore help European industry to lead the global development of alternative propulsion technologies. Given that the mobility sector is responsible for a large part of the EU's total greenhouse gas emissions, the Green Deal [2], the European Union (EU) mechanism for the transformation of the energy system [3], and the development of a green and sustainable economy in a post-COVID-19 scenario [4] has, as its main objectives, to reduce greenhouse gas (GHG) emissions by at least 55% by 2030 and to reduce greenhouse gas (GHG) emissions by 90% by 2050, achieving climate neutrality [2] to strengthen sustainable development [5].

To this complex scenario must be added the fact that, as global emissions are becoming more and more worrying, the regulations for greenhouse gases and air quality imposed on vehicles to comply with emissions targets according to the European vehicle type approval procedure WLTP (World Harmonized Light-duty Vehicle Test Procedure) [6] are correspondingly stricter [7].

Therefore, it is necessary to propose strategies to improve the efficiency of current vehicle designs, and one of the areas of work is in the improvement of the aerodynamic efficiency of moving vehicles, which also benefits all types of current passenger vehicles regardless of the type of propulsion they use. One of the main problems with the aerodynamics of today's vehicles is airflow, as the impact of air on moving vehicles causes high resistance to movement. One solution to optimize vehicle efficiency and reduce energy consumption is to reduce aerodynamic drag, which has been studied from the point of view of numerical optimization [7], technical design [8], the development of specific algorithms [9], and which has a quadratic relationship with the driving speed [10].

Several studies have concluded that proper vehicle design would be necessary to decrease the aerodynamic drag generated at the rear of vehicles [11]. In this sense, the

literature identifies works focused on different vehicle devices, such as the state of the wheels [12] or the use of flaps [13]. Since air is a great source of energy in other energy systems such as wind energy, the concern of this research stems from the objective of taking advantage of the great force of the airflow impinging on vehicles, to transform a part of the problem into a competitive advantage. In addition, the study also arises from the concern of needing to reduce the use of various types of fuels, due to the great environmental and socioeconomic problems that they entail both in the present and in the future.

To reduce aerodynamic drag, several studies have analyzed the structural modification of vehicles [14], for example, by studying the influence of the wheels [15], the influence of flaps [16], or performing different types of rounding in the outer parts of the rear area, some of the purposes being the control of vortices [17], turbulence [18], boundary layer or drag force [19].

Likewise, there are lines of research [10] that seek to reduce aerodynamic drag by developing different deflector models, each of which is validated with CFD computational simulation, which allows a better understanding of the behavior of the air in different situations. These studies develop passive [20] or active methods [21] to reduce aerodynamic drag or analyze the influence of certain moving vehicle components on aerodynamic drag [22]. Therefore, with the common aim of reducing aerodynamic drag, the present paper focuses on the pressure difference between the front and rear of a car, which is the main cause of aerodynamic drag [23], intending to decrease this difference by increasing the air pressure at the rear. Several studies [24] have developed this idea by “base bleed”, inserting air channeling ducts that longitudinally cross the entire vehicle located inside the vehicle in the base region, and have used this idea to achieve fuel efficiency increases [25] or to reduce aerodynamic drag [26]. However, the present research analyzes the incorporation of a ducting system based on a deflector that is placed on top of vehicles, without requiring internal structural changes to the vehicle.

As can be noticed in Figure 1a, the air trajectory at the rear of vehicles approximately follow the red arrows, so that a vacuum is generated, that is, a suction between the vehicle and the air trajectory, which acts as a brake on forward motion. Therefore, after identifying the problem, the objective developed in the present investigation is based on the deflector located at the top of the vehicle, capturing and channeling the incident air at the front and redirecting it to the rear, to fill the suction area with positive pressure, as indicated by the green arrows in Figure 1b.



Figure 1. Air flow path: (a) vehicle without deflector; (b) vehicle with built-in deflector.

The act of channeling air from the upper part has already been verified computationally [27], however, it was based on making a groove on the roof of the vehicle itself, unlike the present research, which is based on anchoring a deflector to the roof of the vehicle that allows a greater volume of incident air to be captured and channeled. In addition, the present study has been experimentally verified, promoted mainly because there is insufficient theoretical information available for the equations that govern fluid mechanics in certain new circumstances with interest in investigating new behaviors; this forces automotive aerodynamics to be a predominantly experimental science since, in this way, real-world values are measured and assessed, which provides a lot of additional value to computational simulations, which are a valuable tool in themselves. Because of this, several studies analyze aerodynamic variables such as drag coefficient [28], vortices [29], turbulence [30], boundary layer, or stability [31], through experimental testing. The preced-

ing literature also proved that prototypes such as the one presented here are also interesting in the evaluation of fatigue life [32,33], and lateral stability improvement [34].

2. Materials and Methods

With the objective of designing a deflector capable of taking advantage of the great force of airflow that hits the front of a moving vehicle and transferring it to the rear of the vehicle, thus reducing fuel consumption, the present research has been structured in the following phases (Figure 2): (i) Phase I: design of the deflector; (ii) Phase II: aerodynamic simulations; (iii) Phase III: mechanical design and construction; and (iv) Phase IV: experimental tests. The methodology illustrated in Figure 2 is based on previous papers which followed similar methodologies for studying other inventions [35].

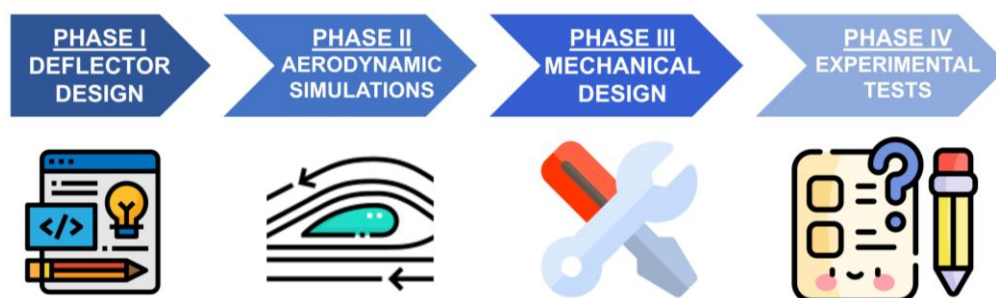


Figure 2. Research methodology outline.

In the design phase of the deflector in 3D software (Phase I, Figure 2), the upper deflector was designed in Autocad 3D[®]. Likewise, a vehicle considered a model (Figure 3a) was designed in the same software, and the deflector system was incorporated in parallel to this model (Figure 3b).

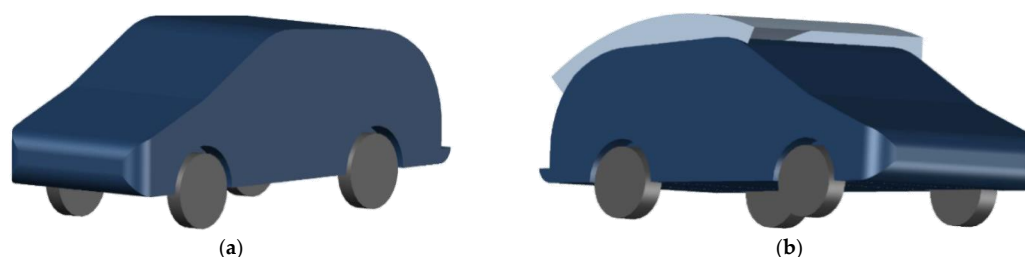


Figure 3. Autocad 3D[®] design: (a) vehicle without deflector; (b) vehicle with incorporated deflector.

In the aerodynamic simulations phase (Phase II, Figure 2), Autodesk Flow Design[®] was used to perform different aerodynamic simulations, subjecting the vehicle without the deflector to the same aerodynamic conditions previously defined, and then the vehicle with the deflector designed in Phase I, to analyze the difference in the behavior of the airflow for both the conventional vehicle and vehicle with the deflector system incorporated.

To then experimentally validate the results obtained in the computational simulation [36], the deflector was mechanically designed and built (Phase III, Figure 2) to fit a 1:12 scale model car, which was also specifically designed and built (Figure 4). In the figure images, the model car appears with the deflector system already incorporated; however, it can be easily removed and put on due to a groove made on each upper side. The wheels used were made with ball bearings to ensure adequate mobility. The channeling system design was based on a deflector with a curvature that allows the internally circulating airflow to maintain, as much as possible, uniformity of projection to avoid turbulence. This design allowed air to be captured from the front, from the hood, and in turn, from the roof, with the three edges of the deflector having a water drop profile [37,38] in section and front curvature to favor aerodynamics. In turn, the rear shape of the deflector has a downward curvature, which forces the projection of airflow circulating inside the deflector

to descend to the vacuum area when it leaves the duct because its geometry forces the redirection of air to the rear area of the car near the wall of the same. In addition, an open suction wind tunnel with a closed test chamber (Figure 5), with a useful working section of 35 cm × 40 cm × 100 cm, was designed and built.



Figure 4. Car model with built-in deflector: (a) front side; (b) rear side.



Figure 5. Wind tunnel design.

Finally, in Phase IV, the experimental testing phase (Figure 2), the model with and without the deflector was subjected to different airflow conditions in various experimental tests. The objective was to measure the pressure at the rear of the vehicle model since this area is the most affected by the deflector duct system, and it is of interest to analyze the values of the pressure variations in this area. The measurements were made using a water column, therefore, the upper lid of the test chamber was made of wood instead of methacrylate to allow the Pitot tube to be introduced through the various holes drilled in the wood (Figure 6), which allowed measurements to always be taken in the same places.

The selected measurement points were established in the same plane at different points at the rear area of the vehicle with the same common distance from the end of the vehicle; a total of nine different points were determined that sufficiently allowed the behavior of the air on the model with and without the deflector to be defined, measured, analyzed, and compared.

Figure 7a shows the plane on which the nine points were measured. The test points were referenced to an XYZ coordinate system so that the X-axis represented the separation distance from the end of the vehicle, the Y-axis the height measured from the ground, and the Z-axis the transverse distance whose origin is located at the lateral edge of the model (cf. Figure 7a).

It should be noted that the notation used in this study is X_i , Y_j , and Z_j , where X, Y, and Z are the previously defined Cartesian axes, i denotes the distance in cm from the origin on the X-axis, and j denotes the distance in mm from to the origin in the Y and Z axes. Thus, from Figure 7a, the coordinates of the different points can be established in the following

points (Table 1): three points defined on the Z-axis at 20 mm, 60 mm, and 100 mm from the coordinate origin (Z20, Z60, and Z100, respectively), and another three points on the Y-axis, at 35, 65, and 95 mm from the origin (Y35, Y65, and Y95, respectively). This constitutes a measurement plane formed by a 3×3 matrix with nine points (A, B, C, D, E, F, G, H, and I) according to Table 1.

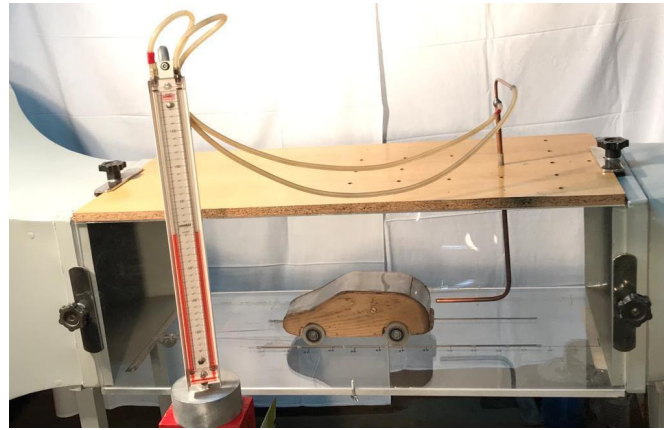
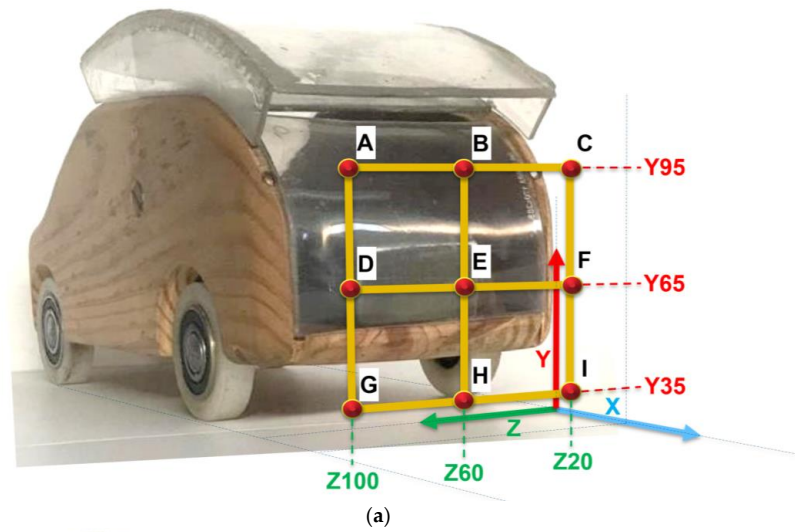
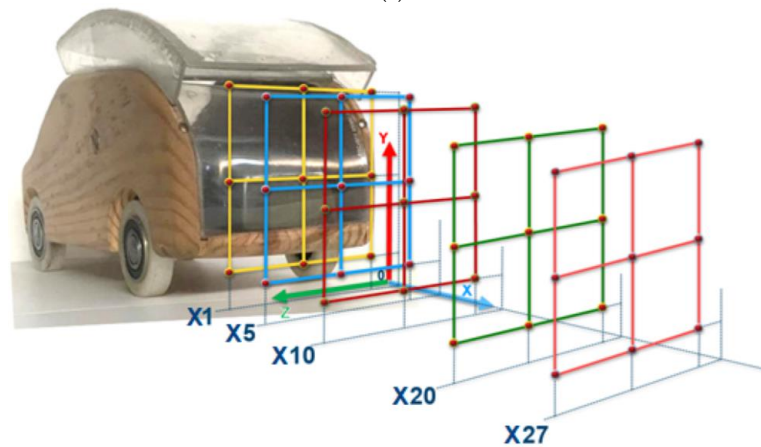


Figure 6. Measuring system.



(a)



(b)

Figure 7. Measuring points: (a) on the YZ plane; (b) on the air wake (X-axis).

Table 1. Measurement points in the various planes.

	Z100	Z60	Z20
Y95	A	B	C
Y65	D	E	F
Y35	G	H	I

In addition, it was deemed necessary to take measurements at different distances from the rear end of the model (X-axis), in order to improve the determination of the airflow wake and thus be able to analyze the influence of incorporating the aerodynamic ducting system. The distances thus considered in the X-axis were 1 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm, and 27 cm, resulting in planes X1, X5, X10, X20, and X27, respectively (Figure 7b). As each of these five distances establish the nine measurement points that make up each measurement plane (Table 1), a total of 45 measurement points were considered in this study.

As a last step, all measurements were repeated at three different air speeds supplied by the wind tunnel at a laminar flow in the test chamber, so that the influence of airflow speed on the efficiency of the ducting system could be analyzed. The first speed was equivalent to a vehicle speed of 35 km/h (equivalent to 6 mm H₂O), the second speed equivalent to 41 km/h (equivalent to 8 mm H₂O), and the third speed equivalent to 50 km/h (equivalent to 12 mm H₂O).

The criterion to establish the three airflow speed values was based primarily on the fact that the maximum speed that the wind tunnel could supply using the 2 kW suction fan, and guaranteeing at all times that the airflow had the optimum laminar flow conditions in the testing chamber, was 50 km/h. Therefore, the value of 50 km/h was set as necessary to evaluate the model at the maximum achievable speed. In addition, a minimum speed value of 35 km/h was set based on previous measurements in which the authors observed that below 35 km/h, the pressure values obtained were less relevant. Finally, to enhance the analysis of air behavior in the wake of the model, it was considered appropriate to measure at a third speed of 41 km/h between the maximum and minimum speed values.

Thus, the selection of 45 points and 3 different speeds yielded 135 measurement cases. Additionally, two pressure measurements were taken at each of the 135 measurement cases, one with and one without the deflector. Therefore, a total of 270 different pressure values were analyzed in this research work.

3. Results and Discussion

First, the results of the computational simulations carried out using Autodesk Flow Design[®] software are shown. In Figure 8a, the mock-up of the conventional vehicle is shown, where the wake left by the vehicle as it moves forward is dark blue. However, in Figure 8b, the mock-up has the deflector system incorporated in the upper part and it can be seen that the deflector manages to provide a different wake to the rear of the vehicle, represented by the additional light blue area.

Likewise, Figure 9 shows in greater detail the direction of the airflow lines in the simulation of the vehicle in motion incorporating the deflector, showing that at the exit of the deflector, the air is redirected toward the lower rear part of the model.

The data were obtained from the average of 270 measurements (Appendix A), structured mainly in seven blocks: (i) point in the plane at which the values are taken (Figure 7a); (ii) measurement distance from the end of the vehicle (distance on the X-axis); (iii) speed supplied by the wind tunnel to the mock-up located in the test chamber, (*V*); (iv) measurement height from the ground (distance on the Y-axis); (v) 135 pressure values measured with the conventional mock-up without deflector at each measurement point—this block is subdivided into three columns because each of them represents the distance from the origin of the Z-axis (Figure 7a); (vi) 135 pressure values with the incorporation of the deflector system to the model—this block is also subdivided in three columns due to the fact that each of them show the distance from the origin of the Z-axis (Figure 7a); and (vii) comparison of

pressure without deflector (P_α) and with deflector (P_β) at each of the nine points measured, indicating the respective pressure difference ($P_\beta - P_\alpha$) at each measurement point. In turn, this last block was subdivided into three columns because each of them indicated the distance from the origin of the Z-axis (Figure 7a).

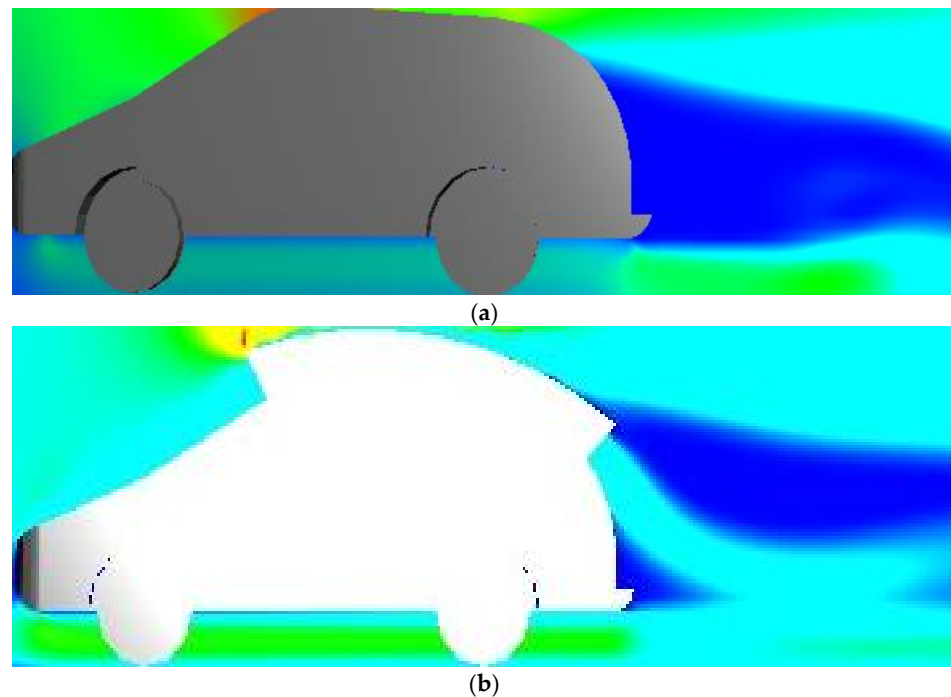


Figure 8. Vehicle wake: (a) without deflector; (b) with deflector.

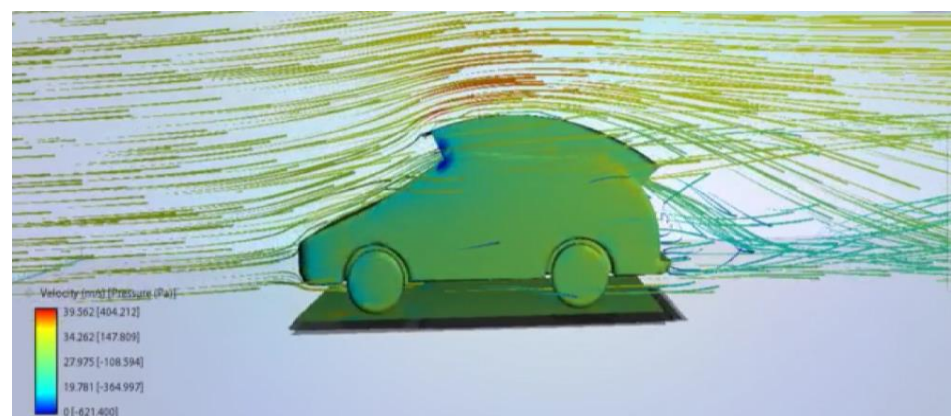


Figure 9. Direction of airflow lines with deflector.

First, using the computational simulation with the Autodesk Flow Design[®] software, as shown in Figure 8, it can be seen that the upper deflector captured and channeled the airflow that hit the front of the vehicle, and in taking advantage of its force and transferring it to the rear area, a new airflow appears in the wake left by the vehicle, with positive pressures that manage to fill a previously empty area that consisted of only negative pressures. This concept corresponds to that obtained in the studies [24,25], which implemented a similar channeling system, also taking advantage of the incident air at the front of the vehicle; nevertheless, the arrangement of the ducts is different since they are located inside the bottom of the vehicle. However, this study [27] did also have a duct at the top based on a slot in the roof, which verifies the effect.

Second, the results obtained from the experimental tests were analyzed, observing mainly that in the measurements taken from the conventional model without deflector, 40%

of the pressures have negative values; however, in the results of the measurements from the model incorporating the upper deflector system, 100% of the pressures have positive values, thus achieving the fundamental objective of this study. This had been achieved because it was possible to significantly increase the value of the pressure at the rear area of the vehicle, thereby eliminating all the negative pressures that generated the vacuum zone.

Next, the analysis of the airflow behavior was deepened using the results obtained from the experimental tests. Appreciating the difference in pressures ($P_\beta - P_\alpha$, Appendix A) at the 135 measured points, and considering the subtraction of the deflector pressure values from those measured without, it was revealed that all values were positive or at least 0, which indicates that 60% of the initial positive values without the deflector had a lower magnitude than the values with deflector. Therefore, at all of these measuring points, the deflector also provides a great advantage, since it favors vehicle thrust. This fact also then implies that at all of the measured points, the deflector redirects an airflow that allows the pressure in the entire analyzed wake to increase, effectively managing to propel the car.

The values computed as the difference in pressures ($P_\beta - P_\alpha$, Appendix A), besides being all positive at each point compared, in many cases reached values of high magnitude, even significantly exceeding the magnitude of the absolute value of the pressures obtained without the deflector. Likewise, the pressures found from the pressure difference (calculated as $P_\beta - P_\alpha$) represent the pressure with which the vehicle can be propelled forward at that point, which is equivalent to having an airflow of, for example, 7 mm H₂O or its equivalent vehicle speed of 38 km/h, propelling the vehicle from the rear in its direction of travel. The maximum pressure difference ($P_\beta - P_\alpha$) value obtained was 15 mm H₂O (at a speed of 50 km/h, in the plane located 1 cm from the X-axis (X1), at a height of 95 mm from the Y-axis (Y95) at 60 mm from the Z-axis (Z60)), which translates to driving the vehicle with an airflow of 55 km/h.

When comparing the pressure measurements with the speed (Figure 10) and with respect to the X-axis (Figure 7), i.e., the distance from the model at which it has been measured, the evolution of the pressure values with and without the deflector can be observed. In turn, to know the pressure evolution with speed, the pressures were analyzed at each of the three speeds (V): at 35 km/h (Figure 10a), at 41 km/h (Figure 10b), and at 50 km/h (Figure 10c). The mean pressure values of each of the five planes (X1, X5, X10, X20, and X27) were represented as ordinates, each plane being made up of nine pressure measurements.

Firstly, it was observed that the three series of pressure measurements without the deflector started with negative pressure values, and as the measurement point moved away from the vehicle, positive pressure values increased. At the same time, the pressure series with the deflector also tended to increase, although it can be seen that at the start, they were already positive values and it ended with positive values of greater magnitude compared to those measured without the deflector. The geometry of the three graphs of the series with and without the deflector are relatively similar. As a result, the higher the speed, the greater the distance between the corresponding series. The comparative gain achieved by the deflector in terms of speed is equivalent to the surface area between the series with deflector and the series without deflector in each of the three graphs in Figure 10. Therefore, it was determined that, at higher speeds, larger pressure differences are achieved thanks to the flow captured, channeled, and redirected by the deflector, which implies that the efficiency of the deflector system increases as the vehicle speed increases.

In the area of the wake closest to the end of the model (measurements made in the planes located at X1, X5, and X10 according to Figure 10), the greatest gain was observed as higher pressures were obtained, which implies a greater decrease in aerodynamic drag. At the same time, it was observed how the pressures progressively attenuated as the measurement point moves further away from the end of the vehicle. Therefore, the advantage of the recirculating air from the deflector exists until at least a distance of 27 cm from the rear of the vehicle, which is the last distance that has been considered significant. In turn, the magnitude of the deflector recirculated airflow effect decreases as

the measurement separation distance increases, which is consistent with the computational simulation reflected in Figure 8.

On the other hand, the pressure values obtained with respect to the Y-axis of the measurement reference points (Figure 7) are examined, so that according to Figure 11, the three series of measurements associated with the three coordinates without the deflector following similar trajectories in the three graphs at 35 km/h (Figure 11a), 41 km/h (Figure 11b), and 50 km/h (Figure 11c). However, when considering the deflector, the Y95 coordinate is significantly higher than the other two lower coordinates Y65 and Y35, which implies that the highest pressure contributions provided by the deflector-channeled air are achieved at a height of Y95 mm. This effect is because this is the zone where the airflow channeled by the deflector arrives with higher velocity and pressure so that in the lower coordinates of Y65 and Y35, it is perceived that the airflow is losing potential as it dissipates.

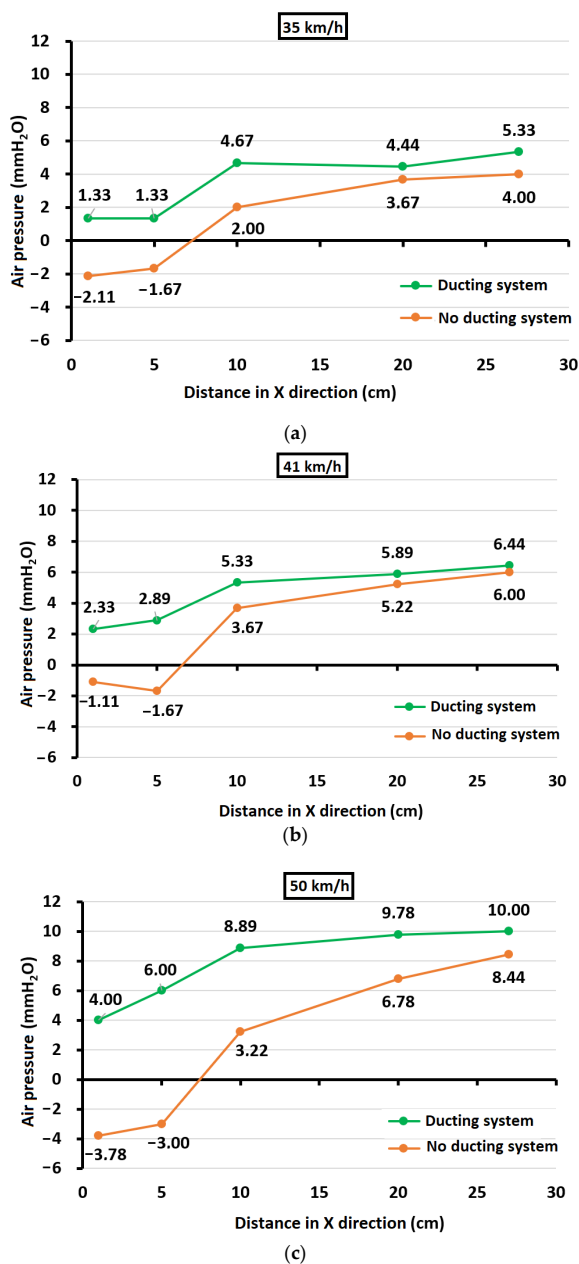


Figure 10. Comparison of pressures with and without deflector with respect to the X-axis at different velocities (V): (a) 35 km/h; (b) 41 km/h; and (c) 50 km/h.

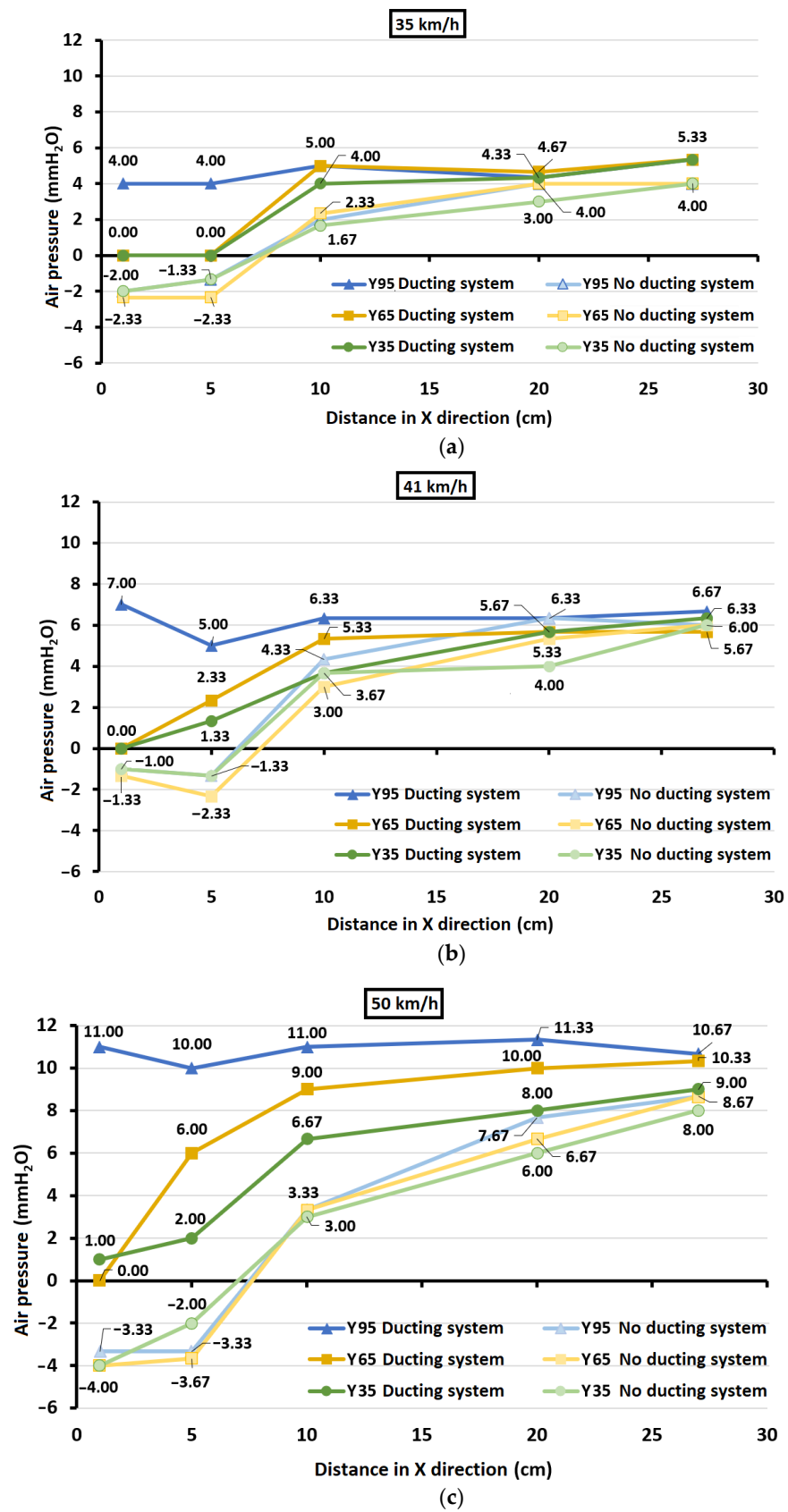


Figure 11. Comparison of pressures with and without deflector with respect to the Y-axis at different velocities (V): (a) 35 km/h; (b) 41 km/h; and (c) 50 km/h.

When analyzing the values of the pressures with respect to the Z-axis according to the established measurement points (Figure 7), it is observed in Figure 12 that the pressures in absolute values are higher in the central Z60 coordinate, both with and without deflector.

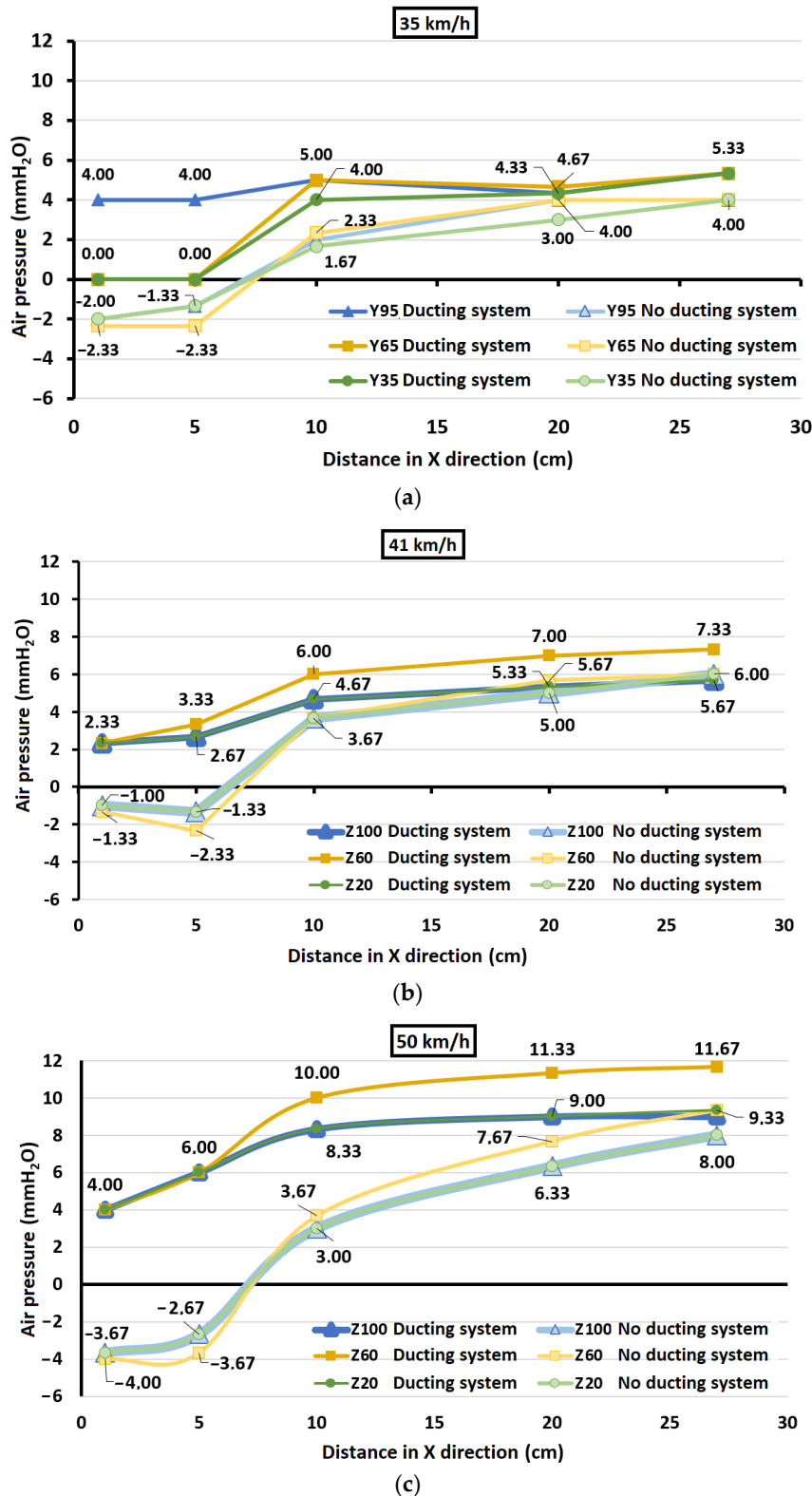


Figure 12. Comparison of pressures with and without deflector with respect to the Z-axis at different velocities (V): (a) 35 km/h; (b) 41 km/h; and (c) 50 km/h.

In addition, symmetry is manifested, the Z60 coordinate being the axis of symmetry, since the series associated with Z20 and Z100 overlap, which happens in both with and without deflector analyses, thus maintaining this effect despite the variation in speed represented in each of the three graphs of (a) 35 km/h, (b) 41 km/h, and (c) 50 km/h. This result was because the air from the sides contributes to bringing greater pressure to the central area, and in turn, for the coordinates Z20 and Z100, the full force of the air is not used because it is dispersed as it was closer to the end of the volume occupied by the vehicle.

An estimated measurement of the performance of this device could be made from the energy balance of the vehicle with and without the deflector. The forces involved in the vehicle motion are (i) rolling resistance (F_R), (ii) aerodynamic drag (F_A), (iii) slope resistance (F_S) (in this case a flat surface will be considered so $F_S = 0$), and (iv) thrust force (F_P).

Rolling resistance can be calculated from Equation (1):

$$F_R = k \cdot m \cdot g \tag{1}$$

where k is the dynamic friction coefficient, m is the vehicle mass, and g denotes gravity. It has been assumed that $k = 0.03$, which is the average value for a road in good condition [39], the mass m of the model is 0.99 kg, and that of the deflector is 0.12 kg.

The aerodynamic drag can be computed with Equation (2):

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S \cdot r \cdot v^2 \tag{2}$$

where C_x represents the aerodynamic drag coefficient, assumed to be $C_x = 0.32$, considering the value given by manufacturers for a similar body model and that for most cars, $0.30 < C_x < 0.35$; S is the front surface of the vehicle affected ($S_\alpha = 0.01426 \text{ m}^2$ in the case without deflector, and $S_\beta = 0.01612 \text{ m}^2$ for the case with deflector); r is the air density ($r = 1.225 \text{ kg/m}^3$, according to ISA (International Standard Atmosphere) at sea level and 15°C); and v is the vehicle speed ($v = 50 \text{ km/h} = 13.89 \text{ m/s}$).

Equation (2) can also be used to obtain the value of F_P , but considering the thrust surface as half of the rear surface of the vehicle ($S = 0.00806 \text{ m}^2$), then the value of the velocity (v) at the rear area of the vehicle is obtained from the equation:

$$P = \frac{1}{2} \cdot r \cdot v^2 \tag{3}$$

where the average pressure P at the rear of the vehicle, for a speed of 50 km/h, can be obtained from Figure 13 and the following computations:

$$P_\alpha (X) = \frac{\int_0^{27} (-0.0144x^2 + 0.9032x - 5.4448) dX}{27} \tag{4}$$

$$P_\beta (X) = \frac{\int_0^{27} (0.0005x^3 - 0.0339x^2 + 0.8413x + 3.0273) dX}{27} \tag{5}$$

This way, the deflector’s efficiency (η) could be considered about 3.8%, according to

$$\eta = \left(\frac{|F_\beta - F_\alpha|}{F_\alpha} \right) \cdot 100 = \frac{(\Delta F_A + \Delta F_R + \Delta F_P)}{(F_A + F_R)_\alpha} = 3.8\% \tag{6}$$

As a future study, it is proposed to carry out more experimental tests to define the wake that originated at the rear of the vehicle in greater detail, for example, by measuring in more planes and at different speeds. The wind tunnel will be optimized by adding a booster fan at the inlet to increase the speed in the test chamber. In turn, with this greater definition of the created effect, the calculation of the performance provided by this deflector system will be studied, analyzing all of the forces that influence the movement of the vehicle, so that the

energy balances of the conventional vehicle and vehicle with the deflector can be compared quantitatively. However, although at this moment the performance of the deflector system has not been quantified, its incorporation already indicates that the deflector will provide an economic saving, since the data already obtained verified that the pressures values were substantially improved, eliminating the resistance to the advance of the vehicle, thus directly implying a fuel saving.

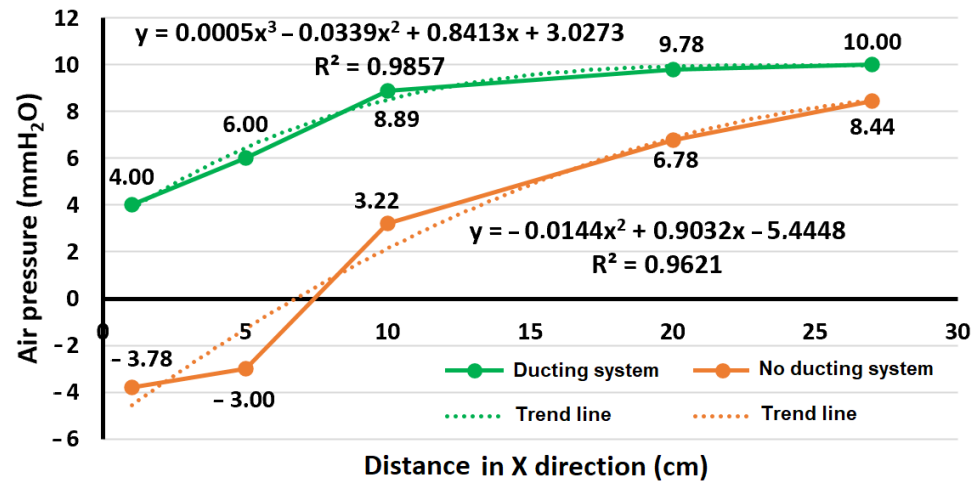


Figure 13. Adjustment of trend lines for pressures at 50 km/h.

The main difference between the prototype described and the actual product is the material since in the deflector model built for the experimental tests, methacrylate has been used, while in the real world, deflectors mass-produced in automotive companies from this prototype would be manufactured in fiberglass. However, both are quite similar materials and no alterations in airflow behavior would be expected. In turn, the methacrylate used for the model is transparent, while the fiberglass used for a vehicle is opaque and can be painted the same color as the car. Furthermore, the anchoring system is different because the deflector for the model is installed using a groove made on the sides of the car, while a deflector of a real car would have to be anchored to the vehicle or be an integral part of it if it was going to be installed to replace the luggage rack; it could be adapted to the same designs of the three main types of anchorages currently existing: (i) vehicles that have four anchor points, such as a nut, on which the deflector is screwed directly; (ii) when the vehicle has longitudinal bars, the anchoring system on which the transversal bars are fixed is used; (iii) if the vehicle does not have anchor points, it could be installed on four claws that are fastened to the lateral ends of the roof of the vehicle.

The deflector system has a high technical feasibility of implementation, since the anchoring system is similar to that of a luggage rack for storage, and can be placed at the same anchorage points so that the installation is direct and does not require any further modification of the vehicle, neither at the structural level nor at the fastening level. Depending on the type and model of vehicle, it would be necessary to make modifications in the design of the respective hoods, basically due to the different dimensions, varying, in turn, the shape of the curvature of the hood, and the height and inclination of the sides that support the upper sheet, since in each type of vehicle it will be necessary to take into account the volume of incoming air.

However, in the manufacture of new automobiles, the installation of the hood should be considered intrinsically and the design of the vehicle itself should be adapted in such a way that it favors the channeling of the air, in the front part for its collection and in the rear area to optimize the redirection of the flow and the consequent use of the same. One methodology could be to make the upper part of the vehicle with a slightly concave curvature and on the other hand, the hood with a slightly convex curvature to form a shape that tends to be cylindrical, to increase the air intake area.

It is also expected to be socially viable due to the competitive advantages it offers; on the one hand, the economic savings already indicated and also for its environmental benefit, since fortunately social awareness about the environment is becoming more and more rooted, and this deflector system is based on a new methodology for the use of air in the automotive industry, which is a renewable energy source, does not pollute, is inexhaustible and reduces the use of other energy resources, including fossil fuels, the source of greenhouse gas emissions that cause global warming. Therefore, there would be a reduction in CO₂ emissions into the atmosphere, which would reduce the overall carbon footprint. Wind energy is also an indigenous energy source, which contributes to reducing energy imports and any use of wind energy contributes to sustainable development.

4. Conclusions

A channeling system for automobiles has been studied and designed to transform the idea that air is a problem into one of an advantage, by taking advantage of the great force of the airflow incident on the front of the vehicle. The system is based on a cavity-like deflector at the top of the vehicle, which allows air to be captured, channeled, and redirected to the rear vacuum zone, filling it with higher-pressure air.

This makes it possible to (i) reduce the aerodynamic drag caused by the negative pressures of the vacuum zone—by channeling and redirecting the air toward the rear vacuum zone, it fills it by providing higher pressures; (ii) reduce the aerodynamic drag caused by the negative pressures of the vacuum zone and even reaching pressures with positive values, absolute values higher than initial ones; and (iii) solve the problem of vacuum generation at the rear of the vehicles and to favor the propulsion of the vehicle, thanks to the contribution of the airflow channeled through the deflector; it has been proven that this airflow allows the area where a vacuum is conventionally generated with the consequent drag to become an area with positive pressures so that this resistive force can be eliminated and a new driving force has been generated that favors the propulsion of the vehicle.

The effectiveness of the deflector system was first verified by computational modeling, observing that the vacuum zone is filled thanks to the air channeled by the deflector. In addition, experimental tests were carried out, corroborating the computational data through a series of 270 measurements.

The system managed to eliminate a resistance of 4 mm H₂O equivalent to a suction airflow rate of 28.8 km/h, so that, at the same points, the previous resistance was transformed into a forward impulse, the impulse being equivalent to an airflow rate of 15 mm H₂O, i.e., an equivalent air speed of 55 km/h, pushing the car from the rear toward the front, favoring its circulation. Finally, the results found at the technical and performance levels make it favorable to further study this invention to evaluate the potential for its commercial development. To this effect, the authors are intending to initiate a fundraising phase to start the commercial development of this invention after a more thorough study of the real potential of the device.

Author Contributions: Conceptualization, J.F.-G.; methodology, J.F.-G.; formal analysis, J.F.-G., P.F.-A., D.V., and Á.A.-S.; investigation, J.F.-G.; data curation, J.F.-G., P.F.-A., D.V., and Á.A.-S.; writing—original draft preparation, J.F.-G., P.F.-A., D.V., and Á.A.-S.; writing—review and editing, J.F.-G., P.F.-A., D.V., and Á.A.-S.; supervision, P.F.-A., D.V., and Á.A.-S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: All the relevant data of the study are presented in the article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Appendix A. Comparison of experimental test pressures

Points of the Plane	X (cm)	V (km/h)	Y (mm)	P_α (mm H ₂ O)			P_β (mm H ₂ O)			$P_\beta - P_\alpha$ (mm H ₂ O)		
				Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20
A/B/C	1	35	95	-2	-2	-2	4	4	4	6	6	6
D/E/F			65	-2	-3	-2	0	0	0	2	3	2
G/H/I			35	-2	-2	-2	0	0	0	2	2	2
A/B/C	5		95	-1	-2	-1	4	4	4	5	6	5
D/E/F			65	-2	-3	-2	0	0	0	2	3	2
G/H/I			35	-1	-2	-1	0	0	0	1	2	1
A-B-C	10		95	2	2	2	5	5	5	3	3	3
D-E-F			65	2	3	2	5	5	5	3	2	3
G-H-I			35	2	1	2	4	4	4	2	3	2
A-B-C	20	95	4	4	4	4	5	4	0	1	0	
D-E-F		65	4	4	4	4	6	4	0	2	0	
G-H-I		35	3	3	3	4	5	4	1	2	1	
A-B-C	27	95	4	4	4	5	6	5	1	2	1	
D-E-F		65	4	4	4	5	6	5	1	2	1	
G-H-I		35	4	4	4	5	6	5	1	2	1	
A/B/C	1	41	95	-1	-1	-1	7	7	7	8	8	8
D/E/F			65	-1	-2	-1	0	0	0	1	2	1
G/H/I			35	-1	-1	-1	0	0	0	1	1	1
A/B/C	5		95	-1	-2	-1	5	5	5	6	7	6
D/E/F			65	-2	-3	-2	2	3	2	4	5	4
G/H/I			35	-1	-2	-1	1	2	1	2	4	2
A-B-C	10		95	4	5	4	6	7	6	2	2	2
D-E-F			65	3	3	3	5	6	5	2	3	2
G-H-I			35	4	3	4	4	5	4	0	2	0
A-B-C	20	95	6	7	6	6	7	6	0	0	0	
D-E-F		65	5	6	5	5	7	5	0	1	0	
G-H-I		35	4	4	4	5	7	5	1	3	1	
A-B-C	27	95	6	6	6	6	8	6	0	2	0	
D-E-F		65	6	6	6	6	7	6	0	1	0	
G-H-I		35	6	6	6	6	7	6	0	1	0	
A/B/C	1	50	95	-3	-4	-3	11	11	11	14	15	14
D/E/F			65	-4	-4	-4	0	0	0	4	4	4
G/H/I			35	-4	-4	-4	1	1	1	5	5	5
A/B/C	5		95	-3	-4	-3	10	10	10	13	14	13
D/E/F			65	-3	-5	-3	6	6	6	9	11	9
G/H/I			35	-2	-2	-2	2	2	2	4	4	4

Points of the Plane	X (cm)	V (km/h)	Y (mm)	P_{α} (mm H ₂ O)			P_{β} (mm H ₂ O)			$P_{\beta} - P_{\alpha}$ (mm H ₂ O)		
				Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20	Z100	Z60	Z20
A-B-C	10		95	3	4	3	11	11	11	8	7	8
D-E-F			65	3	4	3	8	11	8	5	7	5
G-H-I			35	3	3	3	6	8	6	3	5	3
A-B-C	20		95	7	9	7	11	12	11	4	3	4
D-E-F			65	6	8	6	9	12	9	3	4	3
G-H-I			35	6	6	6	7	10	7	1	4	1
A-B-C	27		95	8	10	8	10	12	10	2	2	2
D-E-F			65	8	10	8	9	12	10	1	2	2
G-H-I			35	8	8	8	8	11	8	0	3	0

References

- United Nations Economic Commission for Europe. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29). How It Works, How to Join It. New York and Geneva: Economic Commission for Europe, United Nations. Available online: https://unece.org/sites/default/files/2022-07/ECE_TRANS_289_Rev.1_E_corrected.pdf (accessed on 28 November 2022).
- Ossewaarde, M.; Ossewaarde-Lowtoot, R. The EU's Green Deal: A Third Alternative to Green Growth and Degrowth? *Sustainability* **2020**, *12*, 9825. [CrossRef]
- Pietrzak, M.B.; Olczyk, M.; Kuc-Czarnecka, M.E. Assessment of the Feasibility of Energy Transformation Processes in European Union Member States. *Energies* **2022**, *15*, 661. [CrossRef]
- Tian, J.; Yu, L.; Xue, R.; Zhuang, S.; Shan, Y. Global low-carbon energy transition in the post-COVID-19 era. *Appl. Energy* **2022**, *307*, 118205. [CrossRef]
- Pakulska, T. Green Energy in Central and Eastern European (CEE) Countries: New Challenges on the Path to Sustainable Development. *Energies* **2021**, *14*, 884. [CrossRef]
- Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 Setting CO₂ Emission Performance Standards for New Passenger Cars and for New Light Commercial Vehicles, and Repealing Regulations (ec) no 443/2009 and (eu) no 510/2011. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/ALL/?uri=CELEX:32019R0631> (accessed on 25 November 2022).
- Semeraro, F.F.; Schito, P. Numerical Investigation of the Influence of Tire Deformation and Vehicle Ride Height on the Aerodynamics of Passenger Cars. *Fluids* **2022**, *7*, 47. [CrossRef]
- Kang, S.O.; Jun, S.O.; Park, H.I.; Song, K.S.; Kee, J.D.; Kim, K.H.; Lee, D.H. Actively translating a rear diffuser device for the aerodynamic drag reduction of a passenger car. *Int. J. Automot. Technol.* **2012**, *13*, 583–592. [CrossRef]
- Vahdati, M.; Beigmoradi, S.; Batooei, A. Minimising drag coefficient of a hatchback car utilising fractional factorial design algorithm. *Eur. J. Comput. Mech.* **2018**, *27*, 322–341. [CrossRef]
- Urquhart, M.; Varney, M.; Sebben, S.; Passmore, M. Aerodynamic drag improvements on a square-back vehicle at yaw using a tapered cavity and asymmetric flaps. *Int. J. Heat Fluid Flow* **2020**, *86*, 108737. [CrossRef]
- Littlewood, R.; Passmore, M. *The Optimization of Roof Trailing Edge Geometry of a Simple Square-Back*; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2010. [CrossRef]
- Yu, X.; Jia, Q.; Yang, Z. Comprehensive Study of the Aerodynamic Influence of Ground and Wheel States on the Notchback DrivAer. *Energies* **2022**, *15*, 1124. [CrossRef]
- Ha, J.; Jeong, S.; Obayashi, S. Drag reduction of a pickup truck by a rear downward flap. *Int. J. Automot. Technol.* **2011**, *12*, 369–374. [CrossRef]
- Song, J.; Yoshioka, S.; Kato, T.; Kohama, Y. *Characteristics of Flow Behind a Passenger Vehicle*; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2006. [CrossRef]
- Kurec, K.; Piechna, J. Influence of Side Spoilers on the Aerodynamic Properties of a Sports Car. *Energies* **2019**, *12*, 4697. [CrossRef]
- Wang, Y.; Sicot, C.; Borée, J.; Grandemange, M. Experimental study of wheel-vehicle aerodynamic interactions. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* **2020**, *198*, 104062. [CrossRef]
- Afianto, D.; Han, Y.; Yan, P.; Yang, Y.; Elbarghthi, A.F.A.; Wen, C. Optimisation and Efficiency Improvement of Electric Vehicles Using Computational Fluid Dynamics Modelling. *Entropy* **2022**, *24*, 1584. [CrossRef]
- Lo, K.H.; Kontis, K. Flow around an articulated lorry model. *Exp. Therm. Fluid Sci.* **2017**, *82*, 58–74. [CrossRef]
- Katz, J.; Garcia, D. *Aerodynamic Effects of Indy Car Components*; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2002. [CrossRef]
- Altaf, A.; Omar, A.A.; Asrar, W. Passive drag reduction of square back road vehicles. *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.* **2014**, *134*, 30–43. [CrossRef]

21. Piechna, J. A Review of Active Aerodynamic Systems for Road Vehicles. *Energies* **2021**, *14*, 7887. [[CrossRef](#)]
22. Piechna, J.R.; Kurec, K.; Broniszewski, J.; Remer, M.; Piechna, A.; Kamieniecki, K.; Bibik, P. Influence of the Car Movable Aerodynamic Elements on Fast Road Car Cornering. *Energies* **2022**, *15*, 689. [[CrossRef](#)]
23. Hariram, A.; Koch, T.; Mårdberg, B.; Kyncl, J. A Study in Options to Improve Aerodynamic Profile of Heavy-Duty Vehicles in Europe. *Sustainability* **2019**, *11*, 5519. [[CrossRef](#)]
24. Brown, Y.A.; Windsor, S.; Gaylard, A. *The Effect of Base Bleed and Rear Cavities on the Drag of an SUV*; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2010. [[CrossRef](#)]
25. Sivaraj, G.; Raj, M.G. Optimum way to increase the fuel efficiency of the car using base bleed. *Int. J. Modern Eng. Res.* **2012**, *2*, 1189–1194. Available online: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16934356> (accessed on 1 November 2022).
26. Sivaraj, G.; Parammasivam, K.M.; Suganya, G. Reduction of Aerodynamic Drag Force for Reducing Fuel Consumption in Road Vehicle using Basebleed. *J. Appl. Fluid Mech.* **2018**, *11*, 1489–1495. Available online: https://www.jafmonline.net/article_699_7aa2d948d338b1da8d2a2b1ae9d693f6.pdf (accessed on 1 November 2022). [[CrossRef](#)]
27. Al-Saadi, A.; Al-Farhany, K.; Faisal, A.E.; Azeez, M.; Jamshed, W.; Eid, M.R.; Tag, E.S.M.; Ampjad, A. Improvement of the aerodynamic behaviour of the passenger car by using a combine of ditch and base bleed. *Sci. Rep.* **2022**, *12*, 18462. [[CrossRef](#)]
28. Urquhart, M.; Varney, M.; Sebben, S.; Passmore, M. Drag reduction mechanisms on a generic square-back vehicle using an optimised yaw-insensitive base cavity. *Exp. Fluids* **2021**, *62*, 241. [[CrossRef](#)]
29. Howell, J.; Windsor, S.; Passmore, M. Some Observations on Shape Factors Influencing Aerodynamic Lift on Passenger Cars. *Fluids* **2021**, *6*, 44. [[CrossRef](#)]
30. Cerutti, J.J.; Sardu, C.; Cafiero, G.; Iuso, G. Active Flow Control on a Square-Back Road Vehicle. *Fluids* **2020**, *5*, 55. [[CrossRef](#)]
31. Littlewood, R.P.; Passmore, M.A. Aerodynamic drag reduction of a simplified squareback vehicle using steady blowing. *Exp. Fluids* **2012**, *53*, 519–529. [[CrossRef](#)]
32. Wang, H.; Liu, X.; Chen, T.; Xu, S. Prediction and evaluation of fatigue life via modified energy method considering surface processing. *Int. J. Damage Mech.* **2021**, *31*, 105678952110451. [[CrossRef](#)]
33. Yang, X.B.; Liu, X.T.; Tong, J.C.; Wang, Y.S.; Wang, X.L. Research on Load Spectrum Construction of Bench Test Based on Automotive Proving Ground. *J. Test. Eval.* **2018**, *46*, 1099–1110. [[CrossRef](#)]
34. Ataei, M.; Tang, C.; Khajepour, A.; Jeon, S. Active camber system for lateral stability improvement of urban vehicles. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.* **2019**, *233*, 3824–3838. [[CrossRef](#)]
35. Muñoz-Caballero, J.; Vergara, D.; Fernández-Arias, P.; Antón-Sancho, Á. Design of a smart barrier to internal flooding. *Inventions* **2022**, *7*, 88. [[CrossRef](#)]
36. Desai, S.; Leylek, E.; Lo, C.; Doddegowda, P.; Bychkovsky, A.; George, A.R. *Experimental and CFD Comparative Case Studies of Aerodynamics of Race Car Wings, Underbodies with Wheels, and Motorcycle Flows*; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2008. [[CrossRef](#)]
37. Schuetz, T.C. *Aerodynamics of Road Vehicles*; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2016.
38. Katz, J. *Automotive Aerodynamics*; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2016.
39. Wismer, R.D.; Luth, H.J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *Trans. ASAE* **1974**, *17*, 8–10. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.