

Trabajo Fin de Grado

Análisis del comportamiento de un vehículo Duo Trailer sometido a cargas aerodinámicas, y comparación de prestaciones del vehículo en operaciones de transporte.

Analysis of the behaviour of a Duo Trailer vehicle subject to aerodynamic loads, and comparison of vehicle performance in transport operations.

Autor/es

Darwin Sirio Oca Gadea

Director/es

Emilio Larrodé Pellicer

Resumen

Este trabajo de fin de grado pretende analizar el comportamiento real en prueba en carretera del vehículo DUOTRAILER para poder analizar datos y valores relativos a su estabilidad, eficiencia energética, y consumos, debido a la influencia de fuerzas aerodinámicas sobre los vehículos. Por otro lado, se analizarán las variaciones de consumos y la relación de emisiones correspondientes por km debido a estas acciones externas.

Mediante los registros proporcionados por el CAN bus del vehículo y los datos de dirección y velocidad del viento de estaciones meteorológicas próximas a la carretera se obtendrá la información necesaria para calcular la resistencia aerodinámica a lo largo de la ruta Zaragoza – Martorell en 18 viajes que el camión realizó durante todo junio de 2019.

Con esto se pretende desarrollar un método con el cual, a partir de la previsión de viento del día en la ruta, obtener la velocidad del vehículo óptima para no superar el umbral que se decida de consumo de combustible o emisiones de CO₂ a la atmósfera

Índice

1. Objeto, justificación y alcance	15
2. Estudios previos	17
3. Planteamiento del problema	19
4. Metodología de análisis	22
4.1 Parametrización de la ruta	22
4.1.1 Determinación de los límites de análisis de la ruta	22
4.1.2 Determinación de las zonas de influencia de datos de viento de las estaciones meteorológicas	23
4.1.3 División de la ruta en los diferentes tramos de dirección de avance del vehículo	24
4.2 Cálculo de las resistencias al avance del vehículo	26
4.2.1 Cálculo de la Resistencia a la rodadura (Rr)	26
4.2.2 Cálculo de la resistencia a la pendiente de la carretera (Rp).....	28
4.2.3 Cálculo de la resistencia aerodinámica (Ra).....	29
4.2.4 Cálculo de la resistencia a la inercia (Ri)	35
4.3 Caracterización de la ruta mediante el factor de impedancia o tráfico	36
4.4 Descomposición puntual de la ruta	37
4.5 Cálculo del consumo de Diesel y emisiones de CO ₂	39
5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO₂	41
5.1 Análisis del efecto de las distintas resistencias al avance del vehículo en el viaje 1	41
5.2 Análisis del efecto de la velocidad del viento en carretera en la resistencia aerodinámica en el viaje 1	47
5.3 Análisis del efecto de la velocidad del viento en carretera en la resistencia aerodinámica en el viaje 3	53
5.4 Análisis de las diferencias de valores de resistencia aerodinámica entre el viaje 1 y 3.....	58
5.5 Análisis de la influencia de las resistencias al avance del vehículo en consumo de combustible y emisiones de CO ₂ a la atmósfera	61
5.6 Análisis de la influencia de la resistencia aerodinámica y velocidad del viento en carretera en el consumo de Diesel en el viaje 1	66
5.7 Análisis de la influencia de la resistencia aerodinámica y velocidad del viento en carretera en el consumo de Diesel en el viaje 3	69
5.8 Análisis de las diferencias de consumo de Diesel entre el viaje 1 y 3.....	71

6. Análisis de resultados en los 18 viajes	73
7. Conclusión.....	85
Referencias bibliográficas.....	89
Anexos	91

Anexo I.

Datos horarios de velocidad y dirección de viento de las 8 estaciones meteorológicas desde el 01/06/2019 hasta el 30/06/2019.....	93
---	----

Anexo II.

Registros del CAN bus del vehículo desde el 01/06/2019 al 29/06/2019.....	111
---	-----

Anexo III.

Resultados de cálculo de resistencia aerodinámica, inercia, pendiente, rodadura, energía suministrada por el motor y resistencia total al avance del vehículo en cada uno de los 18 viajes analizados.....	325
--	-----

Anexo IV

Gráficas de velocidad del vehículo, resistencia aerodinámica, de inercia, velocidad del viento, resistencia total vencida por el motor y resistencia a la rodadura en la ruta Zaragoza – Martorell en los 18 viajes analizados.....	555
---	-----

Índice de imágenes

Imagen 1. Duotrailer objeto de estudio de 10 ejes. Fuente: Grupo Sesé	16
Imagen 2. Ruta objeto de estudio, Sesé (PLAZA) – PKW (Martorell). 280 km circulando por la AP-2 y A2. Fuente: propia	19
Imagen 3. Estaciones meteorológicas en la ruta Zaragoza-Martorell. Fuente: propia	21
Imagen 4. Trayecto aislado del análisis de la ruta de estudio. Fuente: propia .	22
Imagen 5. Trayecto de la ruta Zaragoza – Martorell aislado del estudio. Fuente: propia	23
Imagen 6. División de la ruta en 8 zonas de influencia de estaciones. Fuente: propia.	24
Imagen 7. Simplificación de la ruta Zaragoza - Martorell en 5 tramos rectos. Fuente: propia	25
Imagen 8. Valores geométricos de una pendiente. Fuente: propia.	28
Imagen 9. Perfil de altura de la ruta Zaragoza-Martorell. Fuente: propia.	29
Imagen 10. Área frontal de la cabina del Duotrailer. Fuente: Grupo Sesé.	30
Imagen 11. Descomposición de la velocidad del viento. Fuente: propia	32
Imagen 12. Rango de ángulos de dato de viento válido para el cálculo de la resistencia aerodinámica en el tramo 1. Fuente: propia	32
Imagen 13. Rango de ángulos de dato de viento válido para el cálculo de la resistencia aerodinámica en el tramo 2. Fuente: propia	33
Imagen 14. Rango de ángulos de dato de viento válido para el cálculo de la resistencia aerodinámica en el tramo 3. Fuente: propia	33
Imagen 15. Rango de ángulos de dato de viento válido para el cálculo de la resistencia aerodinámica en el tramo 4. Fuente: propia	34
Imagen 16. Rango de ángulos de dato de viento válido para el cálculo de la resistencia aerodinámica en el tramo 5. Fuente: propia	34
Imagen 17. Ejemplo de dos tipos de viaje con diferente factor de impedancia. Fuente: propia.	37
Imagen 18. Interpolación entre los puntos anteriores y posteriores al inicio y final de la ruta. Fuente: propia	38
Imagen 19. Descomposición de la velocidad del viento. Fuente: propia.	48
Imagen 20. Proporción de emisiones de CO ₂ en distintos tipos de vehículos en carretera. Fuente: UE	85

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación de consumo de combustible entre LCV y vehículo convencional. Fuente: Estudio Martini [1].....	18
Tabla 2. Estaciones meteorológicas en la ruta Zaragoza-Martorell de las que se dispone históricos de viento durante junio de 2019. Fuente: propia.....	20
Tabla 3. Coordenadas de división entre las distintas zonas de influencia de datos de viento de las estaciones. Fuente: propia	24
Tabla 4. Coordenadas de separación entre los distintos tramos de avance del vehículo en la ruta Zaragoza - Martorell. Fuente: propia.....	26
Tabla 5. Valores del coeficiente a la rodadura. Fuente: Bauer, H. (1996). Bosch, manual de la técnica del automóvil. Barcelona: Editorial Reverte.	27
Tabla 6. Propiedades de los combustibles. Fuente: R. Edwards. (2011). Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context. Luxembourg: Publications Office of the European Union.....	40
Tabla 7. Cálculos de consumo a partir de la resistencia total. Fuente: propia.	65
Tabla 8. Valores de velocidad media del viento en carretera, velocidad media del camión, factor de impedancia, consumo de Diesel, emisiones de CO ₂ y valores medio por tramo de las distintas resistencias en cada uno de los 18 viajes estudiados en la ruta Zaragoza – Martorell. Fuente: propia.	73
Tabla 9. Consumo de Diesel, resistencia a la inercia media por tramo y velocidad media del viento en la ruta Zaragoza - Martorell. Viajes 15, 5 y 7. Fuente: propia.	75
Tabla 10. Velocidad media del viento, del camión, total y resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia	80

Índice de gráficas

Gráfica 1. Variación del coeficiente de resistencia a la rodadura en función de la velocidad. Fuente: Font, M. (2019). Estudio de la relación del conjunto neumático-llanta de un automóvil, con el consumo energético y la seguridad vial. (trabajo final de carrera). Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa, Barcelona.	27
Gráfica 2. Coeficientes aerodinámicos en función del vehículo. Fuente: Aerodinámica en camiones. (15/9/2019). En Motorenmarcha. Recuperado el 17/10/2019 en http://motorenmarcha.com/aerodinamica-en-camiones/	30
Gráfica 3. Resistencia total vencida por el motor en la ruta Zaragoza – Martorell. (viaje 1). Fuente: propia.....	41
Gráfica 4. Resistencia a la pendiente en la ruta Zaragoza – Martorell. Área rosa: perfil de altura de la ruta. Curva azul: resistencia a la pendiente. Fuente: propia.	42
Gráfica 5. Resistencia de inercia a lo largo de la ruta Zaragoza – Martorell en el viaje 1. Curva azul: resistencia a la inercia. Fuente: propia.	43
Gráfica 6. Aceleración a lo largo de la ruta Zaragoza – Martorell en el viaje 1. Curva azul: aceleración vehículo. Fuente: propia.....	43
Gráfica 7. Velocidad del camión y resistencia de inercia a lo largo de la ruta Zaragoza - Martorell en el viaje 1. Curva naranja: resistencia a la inercia. Curva azul: velocidad del camión. Fuente: propia.	44
Gráfica 8. Resistencia a la rodadura en la ruta Zaragoza – Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia a la rodadura. Fuente: propia.	45
Gráfica 9. Comparativa entre la resistencia a la rodadura en los viajes 1 y 2. Curva naranja: resistencia a la rodadura en el viaje 1. Curva azul: resistencia a la rodadura en el viaje 2. Fuente: propia.	46
Gráfica 10. Coeficiente de rodadura en función de la velocidad del vehículo. Curva azul: coeficiente a la rodadura. Fuente: propia.	46
Gráfica 11. Resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia aerodinámica. Fuente: propia.....	47
Gráfica 12. Velocidad del viento y camión superpuesta a la resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia aerodinámica. Curva gris: velocidad del camión. Curva naranja: velocidad del viento. Fuente: propia.....	52
Gráfica 13. Resistencia aerodinámica, velocidad del viento y del camión a lo largo de la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 3). Curva azul: resistencia aerodinámica. Curva gris: velocidad del camión. Curva naranja: velocidad del viento. Fuente: propia.....	54
Gráfica 14. Velocidad del viento y camión superpuesta a la resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 3). Resistencia aerodinámica. Curva gris: velocidad del camión. Curva naranja: velocidad del viento. Fuente: propia.....	57
Gráfica 15. Resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell en el viaje 1 y 3. Curva azul: resistencia aerodinámica en el viaje 1. Curva naranja: resistencia aerodinámica en el viaje 3. Fuente: propia.....	59

Gráfica 16. Velocidad del camión en la ruta Zaragoza-Martorell (viaje 1 y 3). Curva azul: velocidad del camión en el viaje 1. Curva naranja: velocidad del camión en el viaje 3. Fuente: propia.....	60
Gráfica 17. Velocidad del viento en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1 y 3). Curva azul: velocidad del viento en el viaje 1. Curva naranja: velocidad del viento en el viaje 3. Fuente: propia.....	60
Gráfica 18. Velocidad del viento y resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1 y 3). Curva azul oscura: resistencia aerodinámica viaje 1. Curva azul clara: velocidad del viento en el viaje 1. Curva marrón oscura: resistencia aerodinámica del viaje 3. Curva marrón clara: velocidad del viento en el viaje 3. Fuente: propia.	61
Gráfica 19. Consumo y resistencia total vencida por el motor en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia total vencida por el motor. Columnas naranjas: consumo de Diesel. Fuente: propia.	62
Gráfica 20. Consumo de Diesel frente a perfil de altura en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Columnas naranjas: consumo de Diesel. Zona sombreada rosa: perfil de altura de la ruta. Fuente: propia.	63
Gráfica 21. Resistencia a la pendiente frente a consumo debido a ella en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia a la pendiente. Curva naranja: consumo debido a las pendientes. Fuente: propia.	64
Gráfica 22. Consumo y resistencia a la inercia en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia por inercia. Columnas naranjas: consumo de Diesel. Fuente: propia.	64
Gráfica 23. Consumo y resistencia a la inercia en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva naranja: consumo de Diesel. Curva azul: resistencia a la inercia. Fuente: propia.....	65
Gráfica 24. Resistencia a la rodadura y su consumo debido a ella en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia a la rodadura. Columnas naranjas: consumo de combustible debido a la rodadura. Fuente: propia.	66
Gráfica 25. Resistencia aerodinámica y consumo en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia aerodinámica. Columnas naranjas: consumo de Diesel debido a la resistencia aerodinámica. Fuente: propia.	67
Gráfica 26. Resistencia aerodinámica y consumo en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia aerodinámica. Columnas naranjas: consumo debido a la resistencia aerodinámica. Fuente: propia.....	68
Gráfica 27. Consumo de Diesel debido a la resistencia aerodinámica frente a velocidad del viento en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: velocidad del viento. Columnas naranjas: consumo debido a la resistencia aerodinámica. Fuente: propia.....	68
Gráfica 28. Consumo frente a resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 3). Curva azul: resistencia aerodinámica. Columnas naranjas: consumo debido a la resistencia aerodinámica. Fuente: propia.....	69
Gráfica 29. Consumo de Diesel frente a resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 3). Curva azul: resistencia aerodinámica. Columnas naranjas: consumo debido a la resistencia aerodinámica. Fuente: Propia.....	70

Gráfica 30. Consumo frente a resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 3). Curva azul: velocidad del viento. Columnas naranjas: consumo debido a la resistencia aerodinámica. Fuente: propia.....	70
Gráfica 31. Consumo total en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1 y 3). Columnas azules: consumo de Diesel en el viaje 1. Columnas naranjas: consumo de Diesel en el viaje 3. Fuente: propia.....	71
Gráfica 32. Consumo debido a la resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1 y 3). Columnas azules: consumo de Diesel en el viaje 1. Columnas naranjas: consumo de Diesel en el viaje 3. Fuente: propia.....	72
Gráfica 33. Consumo en función de la velocidad media del viento en la ruta Zaragoza - Martorell para cada uno de los 18 viajes estudiados. Fuente: propia.....	74
Gráfica 34. Consumo en función de la velocidad media del viento en la ruta Zaragoza - Martorell para cada uno de los 18 viajes estudiados. Fuente: propia.....	74
Gráfica 35. Velocidad del viento y emisiones de CO ₂ en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia.....	76
Gráfica 36. Consumo y emisiones en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia.....	77
Gráfica 37. Consumo frente a resistencia aerodinámica media por tramo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia.....	77
Gráfica 38. Consumo y resistencia media por tramo a la rodadura en la ruta Zaragoza - Martorell en todos los viajes analizados. Fuente: propia.....	78
Gráfica 39. Resistencia a la inercia media por tramo y consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia.....	79
Gráfica 40. Factor de impedancia o tráfico y consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia.....	79
Gráfica 41. Velocidad del viento frente a resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia.....	81
Gráfica 42. Resistencia aerodinámica frente a velocidad del vehículo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia.....	82
Gráfica 43. Suma de la velocidad del viento y del camión frente al consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia.....	82
Gráfica 44. Velocidad del camión frente a consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia.....	83
Gráfica 45. Velocidad del viento frente a consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia.....	83
Gráfica 46. Suma de la velocidad del viento y del vehículo frente a consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia.....	84
Gráfica 47. Suma de velocidad del viento y vehículo frente a emisiones en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia.....	84
Gráfica 48. Velocidad del viento y del camión frente al consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia.....	86
Gráfica 49. Velocidad del viento y vehículo frente a las emisiones de CO ₂ a la atmósfera en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia.....	87

1. Objeto, justificación y alcance

La disciplina de la aerodinámica se ocupa del movimiento del aire alrededor y a través de un cuerpo y las interacciones asociadas con este movimiento relativo entre el aire y el sistema del vehículo. Las propiedades aerodinámicas de un vehículo de carretera incluyen efectos sobre su rendimiento, manejo, seguridad y comodidad. En el contexto de este informe, el efecto de la resistencia aerodinámica es el problema crítico (cargas en línea con el movimiento del vehículo) y su efecto sobre el consumo de combustible.

El objeto de este Trabajo de Fin de Grado es analizar las fuerzas aerodinámicas a las que son sometidas el camión Duotrailer de Grupo Sesé con el fin de relacionarlas con el consumo de Diesel y así en función de la previsión de viento en ruta del día del viaje poder reducir, mediante la variación de la velocidad del camión, su consumo y por tanto sus emisiones.

Las cuatro áreas principales identificadas como aerodinámicamente críticas son:

- Flujo de aire alrededor de la cabina y los remolques.
- Flujo de aire alrededor del hueco del tractor-remolque.
- Flujo de aire debajo del remolque.
- Flujo de aire en la parte trasera del remolque.

En este trabajo tendremos en cuenta para el cálculo de la resistencia aerodinámica únicamente la componente frontal del viento que afecte a la cabina en cada momento en la ruta. Despreciaremos las componentes que afecten lateralmente al camión, así como el flujo en el hueco cabina-remolque, debajo del remolque y en su parte trasera, debido a su poca influencia respecto a la resistencia total.

Para ello se han analizado los registros del CAN bus del Duotrailer durante todo junio de 2019 y se han comparado con el perfil de viento que hizo ese mismo mes en la ruta Zaragoza – Martorell. Se han analizado 18 viajes siempre por la misma carretera y en las mismas condiciones de carga.

El Duotrailer se desarrolló inicialmente ya que permite a los operadores tirar de más carga utilizando un tractor y, por lo tanto, un conductor. Esto también reduce la congestión del tráfico, ya que cada LCV (Long Combination Vehicle) es más corto que los dos vehículos combinados equivalentes por la longitud del segundo tractor y la distancia entre los dos vehículos. Otros beneficios de los LCV es una reducción de los gases de efecto invernadero, emisiones y consumo de combustible, ya que solo se requiere una cabina (aunque con un motor más potente) para tirar de dos remolques en lugar de dos cabinas. De ahí la importancia de cuantificar el efecto que tiene la aerodinámica en su consumo con el fin de reducirla.

1. Objeto, justificación y alcance

El camión de estudio es un Duotrailer de 10 ejes, 31,75 metros de longitud, motor de 550 CV, tara de 25,5 t y un peso en carga de 16 t.



Imagen 1. Duotrailer objeto de estudio de 10 ejes. Fuente: Grupo Sesé

2. Estudios previos

La aerodinámica en carretera ha sido objeto de análisis en numerosos estudios debido a su gran influencia en el consumo y por lo tanto en el gasto económico en combustible.

Hay principalmente dos componentes de arrastre que afectan a un objeto en movimiento:

- La resistencia a la presión es la componente de la resistencia que actúa en la dirección del movimiento como resultado de las fuerzas de presión que actúan sobre el cuerpo.
- El arrastre por fricción es la componente del arrastre que actúa paralelo a una superficie como resultado de los efectos de corte y viscosos en el flujo adyacente a la superficie del cuerpo.

Para vehículos pesados, el arrastre de presión es la componente dominante debido a las grandes superficies orientadas hacia la dirección del flujo principal. Aunque el arrastre por fricción ocurre a lo largo de las superficies externas de los vehículos pesados, particularmente a lo largo de los lados y la parte superior de las cabinas y remolques, su contribución al arrastre general es pequeña (10% o menos).

Los resultados de un estudio indicaron que el coeficiente de arrastre de un LCV al tirar de dos remolques puede ser tan pequeño como 0.05 más alto que un vehículo convencional que tira de un solo contenedor a un ángulo de inclinación de viento de 0 grados. Este número aumenta a 0.13 en un ángulo de viento de 5 grados. Por lo tanto, agregar un segundo remolque para formar un LCV, y así duplicar la capacidad de carga, da como resultado un aumento muy modesto en el coeficiente de arrastre de aproximadamente 10% en ángulos de viento frontal de cero grados y 22% en ángulos de viento frontal de cinco grados en comparación con el vehículo de remolque único. O, dicho de otro modo, el coeficiente de arrastre en un LCV es solo marginalmente más de la mitad de la suma del arrastre en los dos vehículos que reemplaza cuando los ángulos del viento están a cero grados.

A medida que aumenta la longitud del vehículo, la contribución porcentual al arrastre general del arrastre por fricción aumenta ligeramente ya que hay mucha más superficie plana alineada con el viento, pero la cara frontal del vehículo permanece sin cambios. Un estudio concluyó que la contribución porcentual de la resistencia a la presión en el vehículo de referencia fue del 93,3%, mientras que la contribución de la resistencia a la presión en el LCV fue del 91,7%.

Un estudio realizado en Suecia por Martini [1] intentó cuantificar la resistencia aerodinámica de un LCV en comparación con la de un remolque de cabina convencional.

Los cálculos se basaron en la suposición de que dos remolques de cabinas están viajando cada uno 100000 km por año a una velocidad constante de 100 km/h,

2. Estudios previos

cada uno tirando de semirremolques de 16 metros. Se supone que el consumo promedio de combustible de los dos vehículos, tomado del sitio web NRCan [2], es de 40 l/100 km. Se utiliza un tercer vehículo para la comparación: un LCV, que consta de una cabina y dos remolques completos. Los cálculos se basan en suposiciones de que a 100 km/h, los efectos aerodinámicos son responsables del 50% del combustible quemado en un camión con remolque de carretera. Utilizando el estudio Martini [1], se supone que el coeficiente de arrastre del LCV es solo un 10% más alto que el coeficiente de arrastre para cada cabina y remolque convencional en ángulos de viento cero y 22% más alto a 5 grados. Además, utilizando datos del Departamento de Transporte de Columbia Británica [3], se supone que el LCV quemará un 39% menos de combustible que los dos remolques de cabina convencionales combinados.

La Tabla 1 ilustra la distribución estimada del consumo de combustible para los dos tipos de vehículos.

Tabla 1. Comparación de consumo de combustible entre LCV y vehículo convencional. Fuente: Estudio Martini [1]

	Cabina 1	Cabina 2	cab 1 + 2	LCV
Distancia recorrida	100 000 km	100 000 km	200 000 km	100 000 km
Combustible quemado	40 000 L	40 000 L	80 000 L	56 800 L
Combustible por resist. Aerodinamica	20 000 L	20 000 L	40 000 L	24 400 L
Combustible por rodadura	20 000 L	20 000 L	40 000 L	32 400 L

3. Planteamiento del problema

Como se ha comentado anteriormente, para analizar la influencia del viento en carretera sobre el Duotrailer se han estudiado los datos del CAN bus durante todo junio. Todo este mes el camión ha realizado la ruta comercial Pamplona – Zaragoza – Martorell. Desde la planta de Volkswagen en Navarra hasta PKW en Martorell parando siempre en la Plataforma Logística de Zaragoza (PLAZA) a las afueras de zaragoza.

La carga del camión ha sido siempre de Pamplona a Martorell de 16 t mientras que desde Martorell a Pamplona de 50 t. La tara del vehículo es de 25,5 t indistintamente de la ruta.

Se ha analizado la ruta Zaragoza (PLAZA) - Martorell (PKW Grupo Sesé) un total de 280 Km circulando primero por la AP-2 y posteriormente por la A2 tal y como se ilustra en la imagen 2.



Imagen 2. Ruta objeto de estudio, Sesé (PLAZA) – PKW (Martorell). 280 km circulando por la AP-2 y A2. Fuente: propia

Se ha decido analizar únicamente la ruta Zaragoza - Martorell ya que su longitud es mayor que la de Pamplona – Zaragoza (180 Km) lo que favorece un estudio más amplio debido a una mayor cantidad de registros del CAN bus en ruta. De la ruta Pamplona – Zaragoza obtenemos una media de 70 registros mientras que de Zaragoza a Martorell la media es de 110.

Básicamente se ha trabajado con dos tipos de datos:

- Datos proporcionados por el CAN bus del camión durante todo junio de 2019. Un total de más de 18000 registros. Anexo II.
- Datos del perfil del viento en la ruta proporcionados por la agencia estatal de meteorología (AEMET) durante todo junio de 2019. Anexo I.

3. Planteamiento del problema

CAN Bus es un protocolo de comunicación en serie desarrollado por Bosch para el intercambio de información entre unidades de control electrónicas del automóvil. “CAN” significa “Controller Area Network” (red de área de control) y “Bus”, en informática, se entiende como un elemento que permite transportar una gran cantidad de información. Estos registros proporcionados por este sistema novedoso en automoción han sido la base para los cálculos que se expondrán más adelante.

Cada uno de los 18000 registros del CAN bus con los que se han trabajado dan los siguientes datos:

Hora, minutos y segundos, cuentakilómetros, altitud, revoluciones, velocidad del GPS, longitud, latitud, matricula vehículo, conductor.

Para perfilar el viento que hizo en la ruta durante todo el mes de junio se han utilizado los registros de viento proporcionados por 8 estaciones meteorológicas situadas en la ruta. Para acceder a estos históricos es necesario ponerse en contacto con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y posteriormente y tras rellenar una solicitud donde entre otros aspectos se tiene que justificar el uso de los datos, envían por medio electrónico los históricos de viento en junio de 2019 de las estaciones solicitadas. En este caso la estaciones las cuales interesaba tener datos por su proximidad a la carretera fueron las de la tabla 2.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas en la ruta Zaragoza-Martorell de las que se dispone históricos de viento durante junio de 2019. Fuente: propia

INDICATIVO	NOMBRE	COORDENADAS
0171X	IGUALADA	41°34'44.0"N 1°37'04.0"E
9434P	ZARAGOZA- VALDESPARTERA	41°37'15.0"N 0°56'06.0" W
9510X	QUINTO	41°25'45.0"N 0°30'14.0" W
9720X	TÀRREGA	41°39'02.0"N 1°08'58.0"E
9729X	MOLLERUSSA	41°37'01.0"N 0°52'00.0"E
9771C	LLEIDA	41°37'34.0"N 0°35'53.0"E
9924X	FRAGA	41°52'47.0"N 0°35'55.0"E
9726E	LLORAC	41°55'72.0"N 1°30'94.0"E

Los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas fueron la dirección y velocidad del viento cada hora en punto desde el 01/06/2019 hasta el 30/06/2019.

La proximidad de cada estación respecto a la ruta estudiada se puede ver en la imagen 3

3. Planteamiento del problema

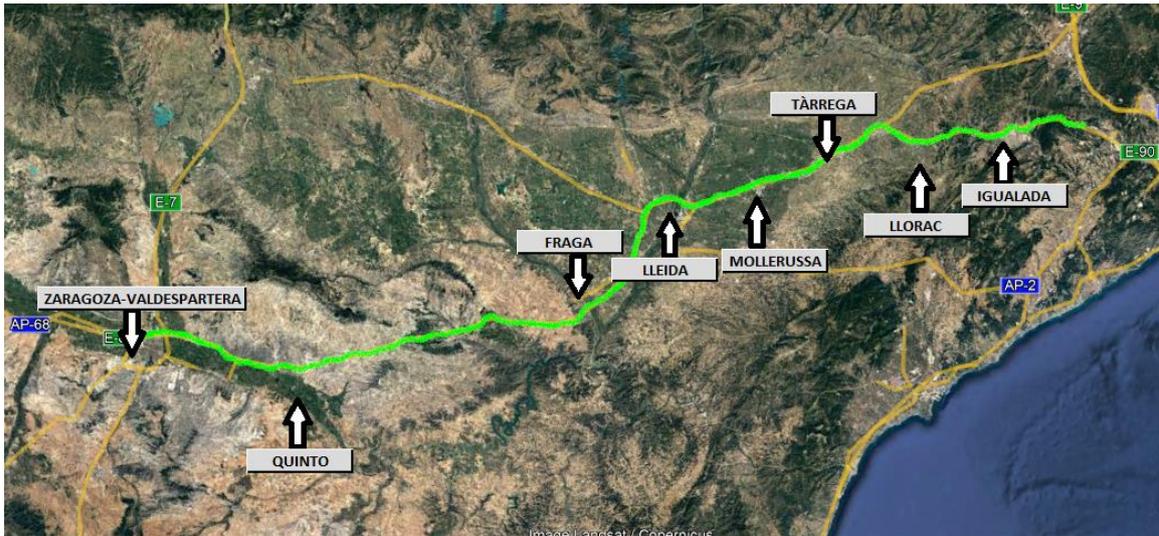


Imagen 3. Estaciones meteorológicas en la ruta Zaragoza-Martorell. Fuente: propia

Mediante estos datos se pudo relacionar la posición del camión en cada momento con el viento que le estaba afectando, tanto en posición como en dirección, como se explicará a continuación.

4. Metodología de análisis

4.1 Parametrización de la ruta

Para empezar a resolver el problema lo fundamental es parametrizar la ruta y realizar las simplificaciones sobre esta, necesarias para los cálculos.

4.1.1 Determinación de los límites de análisis de la ruta

Lo primero que se ha determinado para hacer el análisis de la ruta son los límites de esta, es decir, un principio y un fin. El Duotrailer parte siempre de Plataforma Logística de Zaragoza (PLAZA) donde Grupo Sesé tiene la flota. El camión se incorpora a la autopista A2 a través de una serie de rotondas de acceso a PLAZA. Esta primera parte del recorrido no se ha tenido en cuenta para los cálculos de las distintas resistencias ya que durante estos primeros 17,8 km la velocidad del GPS es intermitente y lo que nos interesa es calcular la resistencia aerodinámica cuando el camión alcanza la velocidad de crucero.

Se ha elegido por lo tanto como inicio de la ruta el punto cuyas coordenadas son (41.6787109444444 -0.85217336111111), a partir de este punto es cuando los registros del CAN bus empiezan a dar una velocidad considerablemente alta y constante y por lo tanto válida para los cálculos de resistencia aerodinámica.

Todo este recorrido que se ha mantenido al margen del análisis queda ilustrado en la imagen 4.

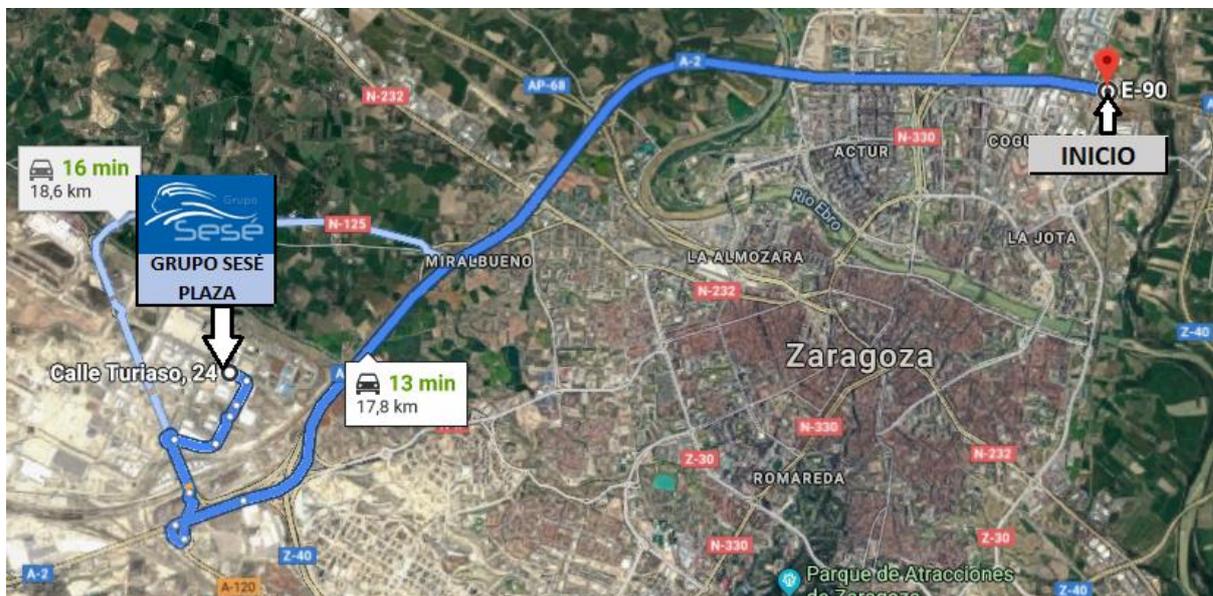


Imagen 4. Trayecto aislado del análisis de la ruta de estudio. Fuente: propia

La misma situación se ha dado para determinar el final de la ruta. Antes de llegar a PKW en Martorell el Duotrailer tiene que circular por una serie de carreteras con limitación de velocidad de acceso a la ciudad, así como rotondas que reducen la velocidad y hace inviable un cálculo de resistencia aerodinámica debido a su variabilidad. Al igual que lo expuesto anteriormente se ha determinado un punto de fin de la ruta que corresponde con las coordenadas:

4. Metodología de análisis

(41.5352745 1.861690000). Con anterioridad a este punto se obtienen velocidades altas y constantes que son aptas para cálculos de resistencia aerodinámica.

En la imagen 5 se puede ver el trayecto que no se ha considerado parte de la ruta de estudio.



Imagen 5. Trayecto de la ruta Zaragoza – Martorell aislado del estudio. Fuente: propia

Por lo tanto, la longitud total de la ruta estudiada queda acotada por las coordenadas antes expuestas. Un total de 263,1 km exactos.

4.1.2 Determinación de las zonas de influencia de datos de viento de las estaciones meteorológicas

A continuación, y considerando la ruta acotada, el siguiente paso ha sido determinar la influencia de cada estación meteorológica en la ruta, es decir, que datos de viento influyen en cada tramo de la carretera. Ya que son 8 estaciones a lo largo de los 263,1 km habrá que dividir en 8 tramos la ruta y relacionarlos con cada una de las estaciones. Para realizar esta división se ha tenido en cuenta la proximidad a la carretera y la horizontalidad respecto a la estación.

Se han determinado por lo tanto 7 puntos de separación entre zonas de influencia y 8 tramos. Las coordenadas de separación entre los distintos tramos, así como las coordenadas de ubicación de cada estación se encuentran reflejados en la tabla 3. Estas coordenadas se relacionan con las que nos proporciona los registros del CAN bus con objeto de conocer en cada momento la zona en la que se encontraba el camión y así conocer la estación cuyos datos de viento estaba influenciando al vehículo.

4. Metodología de análisis

Es decir, si en un momento determinado el dato de coordenadas del registro del CAN bus es: (41.6532401944444 -0.66774) sabremos que ese punto se encuentra entre los puntos de separación 3 Y 4 (zona 4) y por lo tanto tendremos que relacionar ese instante del camión en la ruta con el dato de viento de la estación de Lleida para el mismo dato horario.

Tabla 3. Coordenadas de división entre las distintas zonas de influencia de datos de viento de las estaciones. Fuente: propia

	LONGITUD	LATITUD	
ZARAGOZA-VALDESPARTERA	41.62083	-0,9349900000	ZONA 1
	41.6144714444444	-0,6985400000	PUNTO 1
QUINTO	41.42916	-0,5038800000	ZONA 2
	41.5225	0,0463800000	PUNTO 2
FRAGA	41.52472	0,3555500000	ZONA 3
	41.54799	0,4861700000	PUNTO 3
LLEIDA	41.62611	0,5980500000	ZONA 4
	41.63134	0,7416500000	PUNTO 4
MOLLERUSSA	41.61694	0,8666600000	ZONA 5
	41.63434	1,0364600000	PUNTO 5
TÀRREGA	41.65055	1,1494400000	ZONA 6
	41.6599	1,3088600000	PUNTO 6
LLORAC	41.55722	1,3094400000	ZONA 7
	41.62475	1,4314300000	PUNTO 7
IGUALADA	41.57872	1,6175400000	ZONA 8

En la imagen 6 se puede ver con más claridad la división hecha entre las distintas zonas de influencia de datos de viento. Como se ha dicho anteriormente se divide la ruta en 8 zonas y 7 puntos de separación.

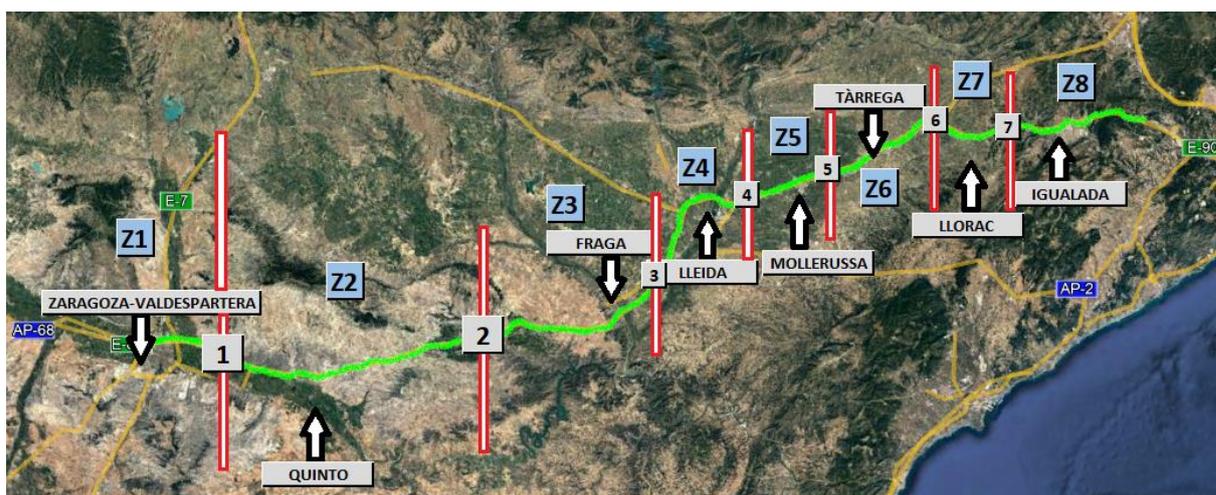


Imagen 6. División de la ruta en 8 zonas de influencia de estaciones. Fuente: propia.

4.1.3 División de la ruta en los diferentes tramos de dirección de avance del vehículo

Para calcular la resistencia aerodinámica en cada punto un factor a tener en cuenta a parte de la velocidad del viento es su dirección, y no solo su dirección,

sino también su dirección relativa al avance del camión. Es decir, un día en el que la velocidad del viento es alta pero la dirección es la misma que la del avance del vehículo, no va a aportar más resistencia aerodinámica, sin embargo, un día con menos viento, pero dirección totalmente opuesta al avance va a producir una alta resistencia. Es importante entonces no solo conocer la dirección del viento en todo momento, si no también conocer la dirección de avance del vehículo en cada instante para luego relacionarla con la del viento.

La dirección del viento en cada instante de la ruta nos lo da los registros de las distintas estaciones. La dirección de avance del camión a lo largo de la ruta es complicada saberla en cada momento, por lo que se ha llevado a cabo una simplificación. Los 263,1 km a estudiar se han dividido en 5 tramos de acuerdo a la distinta rectitud de la carretera. En la imagen 7 se puede ver con más claridad como se ha llevado a cabo la división, 5 tramos con distintos ángulos de avance aproximándose lo más posible a la tendencia de la carretera. Se han tomado los ángulos de tramo de 133° , 90° , 57° , 82° y 106° respecto al norte y según el sentido de las agujas del reloj.

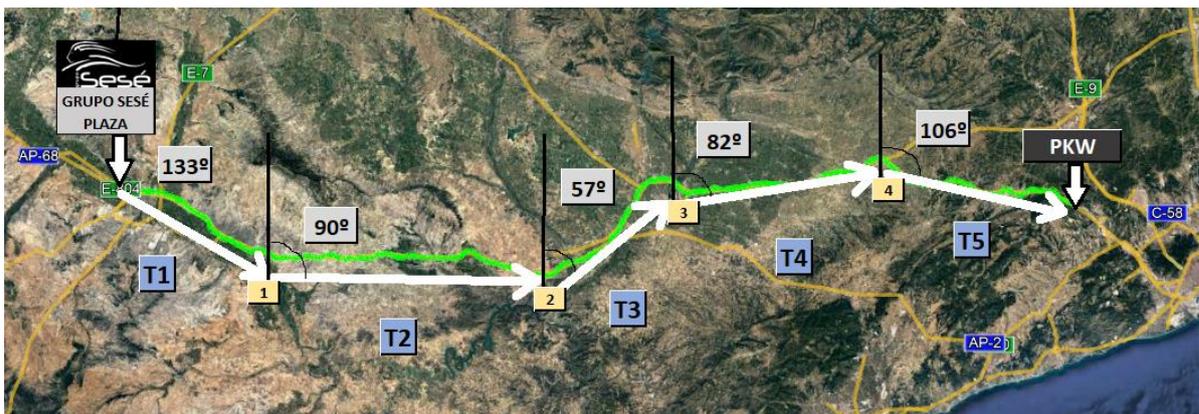


Imagen 7. Simplificación de la ruta Zaragoza - Martorell en 5 tramos rectos. Fuente: propia

Se han tomado a su vez 4 puntos de separación entre distintos tramos, en la tabla 4 se pueden ver reflejadas las coordenadas que se han tomado como puntos de división. En este caso se ha tenido en cuenta únicamente la latitud como punto de separación entre los distintos tramos rectos. Si la coordenada de latitud de los registros del CAN bus es por ejemplo (0,55556667) sabemos que se encuentra entre los puntos 2 y 3 (zona 3) y por lo tanto consideramos que el camión avanza con un ángulo respecto al norte y según las agujas del reloj de 57° .

Esta simplificación de la carretera en tramos rectos es necesaria debido a la complejidad de cálculos que supondría saber en cada instante de los 263,1 km la dirección de avance del camión. Además, saber la dirección de avance en todo momento es fundamental para el cálculo preciso de la resistencia aerodinámica como se expondrá más adelante.

4. Metodología de análisis

Tabla 4. Coordenadas de separación entre los distintos tramos de avance del vehículo en la ruta Zaragoza - Martorell. Fuente: propia.

ZGZ-MARTONELL	LATITUD		
T1<	-0,45937332222222	133,0 °	Punto 1
T2>	-0,45937332222222	90,0 °	
T2<	0,35555000000000	90,0 °	Punto 2
T3>	0,35555000000000	57,0 °	
T3<	0,59805000000000	57,0 °	Punto 3
T4>	0,59805000000000	82,0 °	
T4<	1,24651000000000	82,0 °	Punto 4
T5>	1,24651000000000	106,0 °	

4.2 Cálculo de las resistencias al avance del vehículo

Una vez que ya tenemos parametrizada la ruta con las simplificaciones necesarias el siguiente paso es calcular la resistencia total al avance a la que está sometida el camión en todo momento.

Todo vehículo para poder desplazarse deberá vencer 4 tipos de resistencias, a parte de otros fenómenos puntuales, como baches en la carretera, piedras sobre el camino, etc., que son:

- Resistencia a la rodadura (Rr).
- Resistencia por la pendiente de la carretera (Rp).
- Resistencia debida al aire o resistencia aerodinámica (Ra).
- Resistencia por inercia (Ri).

A continuación, se procederá a explicar cómo se ha calculado en este trabajo cada uno de los tipos anteriores de resistencia por separado:

4.2.1 Cálculo de la Resistencia a la rodadura (Rr)

A la resistencia a la rodadura también se la conoce como rozamiento de rodadura y tiene lugar cuando el neumático rueda sobre una superficie plana en línea recta. Esta resistencia se produce por la deformación del neumático y, en su caso, de la superficie sobre la que se rueda. En este trabajo se ha calculado según la fórmula:

$$Rr [N] = \mu \cdot Fn$$

Siendo $Fn = m \cdot g$; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$; $m = 41500 \text{ kg}$

Se ha elegido un valor de 0,008 de coeficiente a la rodadura de acuerdo a la tabla 5 del libro Bosch, manual de la técnica del automóvil [4]. La masa del camión es la comentada anteriormente, es decir, una tara de 25,5 t y un peso de carga de 16 t.

4. Metodología de análisis

Tabla 5. Valores del coeficiente a la rodadura. Fuente: Bauer, H. (1996). Bosch, manual de la técnica del automóvil. Barcelona: Editorial Reverte.

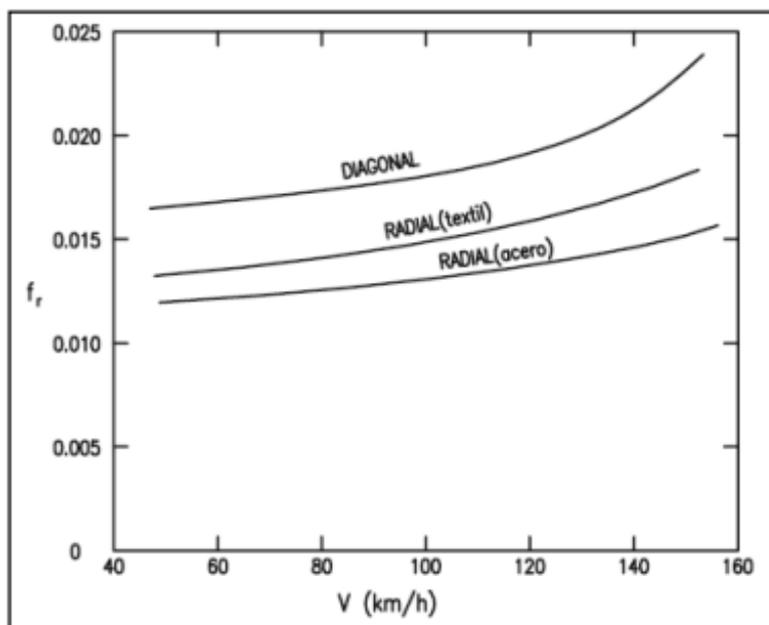
VALORES CARACTERÍSTICOS DEL COEFICIENTE A LA RODADURA	
FIRME	μ
Neumáticos de turismos sobre:	
Adoquines grandes y pequeños	0,013
Hormigón, asfalto	0,011
Camino de tierra	0,05
Suelo arado	0,1 a 0,35
Neumáticos de vehículos industriales sobre:	
Hormigón, asfalto	0,006 a 0,01
Ruedas todo terreno sobre:	
Suelo arado y arena	0,14 a 0,24
Tractor oruga sobre:	
Suelo arado	0,07 a 0,12
	0,001 a
Rueda sobre carril	0,002

El valor del coeficiente a la rodadura también dependerá de la velocidad del vehículo según la gráfica 1 de acuerdo a el “Estudio de la relación del conjunto neumático llanta de un automóvil, con el consumo energético y la seguridad vial” de la Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa [5].

Este valor de coeficiente de rodadura crecerá de acuerdo a la expresión:

$$\mu = (0,008 + 0,002((v \text{ [km/h]}) / 100)^{2,5})$$

Recogida en el portal de la UNED [6].



Gráfica 1. Variación del coeficiente de resistencia a la rodadura en función de la velocidad. Fuente: Font, M. (2019). Estudio de la relación del conjunto neumático-llanta de un automóvil, con el consumo energético y la seguridad vial. (trabajo final de carrera). Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa, Barcelona.

Esta diferencia entre coeficientes es prácticamente insignificante, pero de todos modos y con objeto de ser lo más preciso posible se ha tenido en cuenta en los cálculos.

4.2.2 Cálculo de la resistencia a la pendiente de la carretera (R_p)

La resistencia debida a la pendiente tiene lugar cuando el camión se desplaza cuesta arriba. La fuerza opuesta que se genera es directamente proporcional al peso del vehículo y el ángulo de la pendiente.

Se denomina pendiente de la carretera (i) a la tangente del ángulo inclinado que forma el piso de la carretera con la horizontal, es decir, $i = \text{tg } \alpha = h/L'$, según la imagen 8 que se adjunta a continuación.

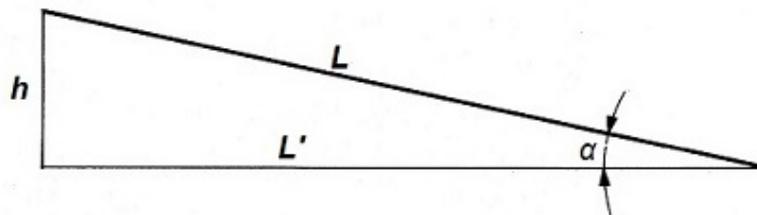


Imagen 8. Valores geométricos de una pendiente. Fuente: propia.

En la mayoría de las pendientes de los trazados de carretera, nos solemos encontrar ángulos pequeños, por lo tanto, se puede simplificar diciendo que:

$$L' \approx L; \text{tg } \alpha \approx \text{sen } \alpha; \text{cos } \alpha = 1$$

Obviamente, en casos de pendiente negativa (cuesta abajo) esta fuerza de pendiente cambia de signo y deja de ser una fuerza de oposición al movimiento del vehículo para convertirse en un apoyo al esfuerzo motor del móvil.

El cálculo de la resistencia a la pendiente en este trabajo se ha calculado por lo tanto según la siguiente fórmula:

$$R_p \text{ [N]} = m \cdot g \cdot \text{tan } \alpha$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2; m = 41500 \text{ kg}$$

Para calcular la pendiente ha sido necesario conocer la altura en todo momento de los 263,1 km de la ruta. Para ello y mediante la aplicación de "Google Earth" se puede conseguir un perfil de altura de la carretera mediante la unión de numerosos puntos. Se ha elegido una distancia de aproximadamente 300 metros entre puntos, lo que nos ha dado un total de 867. Cada uno de los puntos de la ruta lleva consigo sus coordenadas de posición. Posteriormente y para saber la altura de cada uno de los 867 puntos distribuidos a lo largo de la carretera se ha utilizado la aplicación "TCX converter", este programa lo que hace es dar la altura de cada una de las coordenadas que le hayamos introducido, en este caso 867. Con ello dibujamos el perfil de altura que se puede ver en la imagen 9.

4. Metodología de análisis



Imagen 9. Perfil de altura de la ruta Zaragoza-Martorell. Fuente: propia.

Se ha elegido un número de puntos tan elevado para hacer el cálculo lo más exacto posible. Mas tarde se explicará cómo se ha realizado la interpolación de los datos del CAN bus para los 18 viajes estudiados a esta discretización para poder comparar viajes con datos en los mismos puntos del recorrido.

4.2.3 Cálculo de la resistencia aerodinámica (R_a)

La resistencia aerodinámica, es la fuerza opuesta al movimiento que sufre el vehículo cuando se desplaza a través del aire.

El camión tiene que apartar una cantidad importante de aire para poder avanzar y también facilitar que se rellene el vacío que generan tras de sí. La presión del aire contra el frontal y el vacío (succión) generado en la parte trasera se combinan para generar una fuerza opuesta al movimiento.

A velocidades bajas, esta fuerza es relativamente pequeña, pero como veremos a continuación, a velocidades mayores crece considerablemente.

La fórmula que hemos utilizado en este trabajo para calcular esta resistencia es la que aparece a continuación:

$$R_a = \frac{1}{2} d \cdot (v_c + v_a)^2 \cdot A \cdot C_x$$

Siendo:

$d = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (densidad del aire)

v_c = velocidad del camión [m/s]

v_a = velocidad frontal que afecta al camión [m/s]

$A = 10,66 \text{ m}^2 = 4,1 \text{ m} \cdot 2,6 \text{ m} = L [\text{m}] \cdot W [\text{m}]$ (área frontal)

$C_x = 0,6$ (coeficiente aerodinámico)

La superficie transversal efectiva del vehículo (A) que ofrece resistencia al aire, a efectos de cálculos, se obtiene tomando como base el ancho de vía del eje delantero (W) por la altura máxima del vehículo (L).

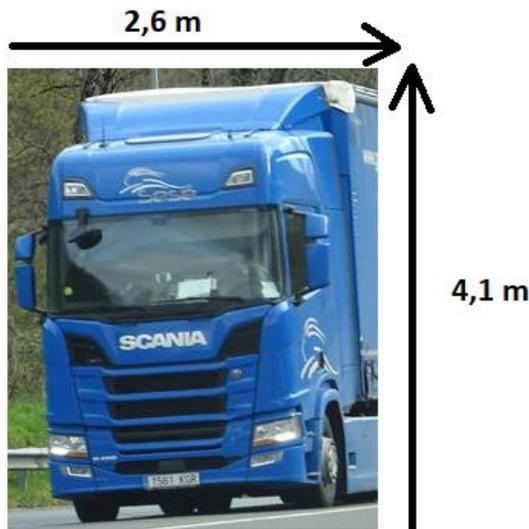


Imagen 10. Área frontal de la cabina del Duotrailer.
Fuente: Grupo Sesé.

En la imagen 10 se puede ver la vista y dimensiones frontales de la cabina del camión que está en contacto con el viento frontal.

El C_x es lo mismo que "Coeficiente de resistencia aerodinámica". Es un número adimensional, es decir, no tiene valor definido su unidad, se obtiene de una forma experimental en túneles de viento. Lo que mide es la eficiencia aerodinámica de un coche: cuánto más bajo es el C_x menos resistencia aerodinámica al avance del coche y, por tanto, menos consumo y más prestaciones.

El coeficiente aerodinámico del camión se ha elegido de acuerdo a la gráfica 2, recogida en el portal [7].



Gráfica 2. Coeficientes aerodinámicos en función del vehículo. Fuente: Aerodinámica en camiones. (15/9/2019). En Motorenmarcha. Recuperado el 17/10/2019 en <http://motorenmarcha.com/aerodinamica-en-camiones/>

Una vez definida la densidad del aire, coeficiente aerodinámico y el área frontal nos faltaría por definir en cada instante del registro del CAN bus la velocidad frontal del viento. La velocidad del camión en cada instante nos la da como dato el CAN bus.

Aquí es cuando hace falta utilizar la simplificación de la ruta en 5 tramos que se ha explicado anteriormente. En cada uno de los 5 tramos solo se tendrá en cuenta la componente de la velocidad del viento que le esté afectando frontalmente, la cual se sumará a la velocidad del camión en la fórmula de resistencia aerodinámica.

Es decir, vamos a tomar como ejemplo para ilustrarlo con más claridad un instante del camión en el tramo 1 de la ruta (cuando el registro de latitud del CAN bus nos esté dando una coordenada de latitud mayor de -0.9194466944444444 y menor de -0,4593733222222222 de acuerdo a las tablas antes expuestas). En este tramo se ha considerado que el camión está circulando a 133° respecto al norte y según las agujas del reloj. Por lo tanto, únicamente le estarán afectando los datos de viento cuya dirección en ese instante este entre 43° y 223° según el sentido horario, es decir, los valores de dirección que se encuentren a un ángulo menor de 90° respecto de la dirección opuesta al avance del camión (133°). El dato de velocidad del viento en ese instante se ha de multiplicar por el coseno de la diferencia de ángulo entre 331° (la opuesta al avance) y el dato del ángulo de dirección del viento. Eso nos da la componente frontal del viento que le está afectando al camión, la cual se debe sumar en la fórmula a la velocidad del vehículo.

Para ilustrar este caso con más claridad voy a exponer un ejemplo práctico:

Supongamos que el camión se encuentra en el tramo 1, avanzando a 133° . En ese momento tenemos un dato de velocidad de viento de 4 km/h a 272° . En este caso al encontrarse a una distancia menor de 90° respecto a la opuesta del avance (313°) el viento sí que le estaría afectando frontalmente con un ángulo de ($313^\circ - 272^\circ = 42^\circ$). Multiplicando los 4 km/h por el coseno de 42° nos daría una velocidad frontal de 2,972 km/h. Este valor se sumaría a la velocidad del camión en la fórmula de la resistencia aerodinámica.

La descomposición de las diferentes velocidades que intervienen en el ejemplo anteriormente expuesto se puede ver con más claridad gráficamente en la imagen 11.

Si en el ejemplo anterior en vez de 4 km/h a 272° el dato de viento fuera de 4 km/h a 92° , no se tendría en cuenta ya que no hay componente frontal que le afecte al vehículo. Es decir; ($313^\circ - 92^\circ = 221^\circ$) que es mayor de 90° .

4. Metodología de análisis

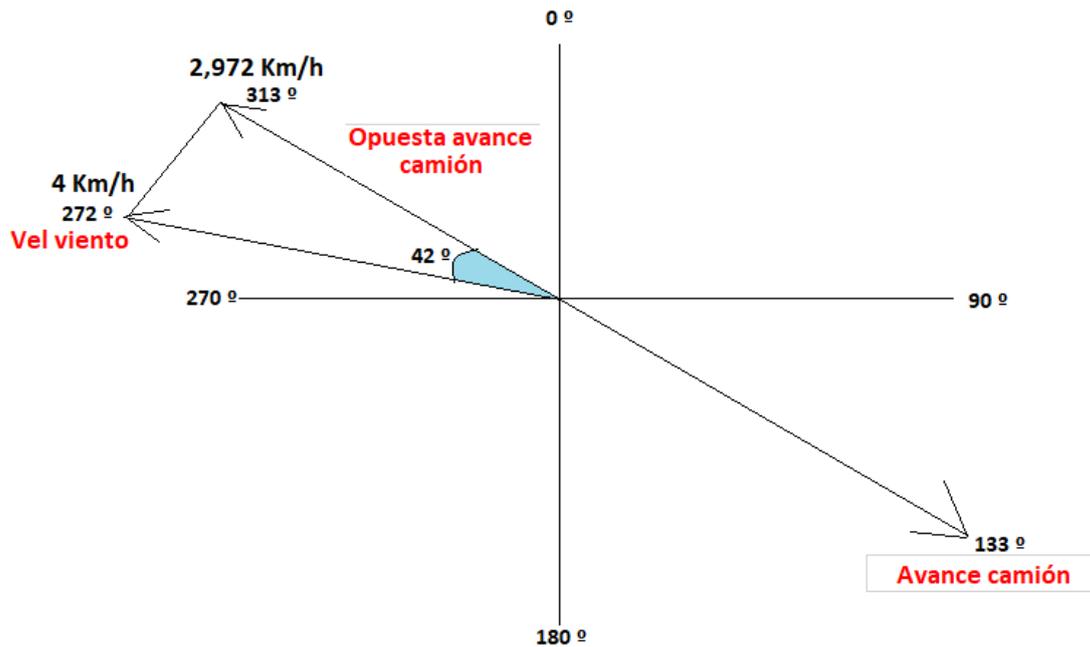


Imagen 11. Descomposición de la velocidad del viento. Fuente: propia

Así es como se ha procedido para calcular la velocidad frontal del viento que le afecta al camión en cada instante que nos daba el registro del CAN bus. Como se ha explicado anteriormente los datos de velocidad de viento totalmente lateral o trasero no se han tenido en cuenta al no tener componente frontal.

A continuación, expongo para cada uno de los 5 tramos, el rango de datos de velocidad del viento que se han considerado para el cálculo de la resistencia aerodinámica. Los datos de viento cuyo ángulo se encuentre dentro de la zona verde en su tramo correspondiente son los que se han utilizado para los cálculos, al encontrarse dentro de las consideraciones antes expuestas.

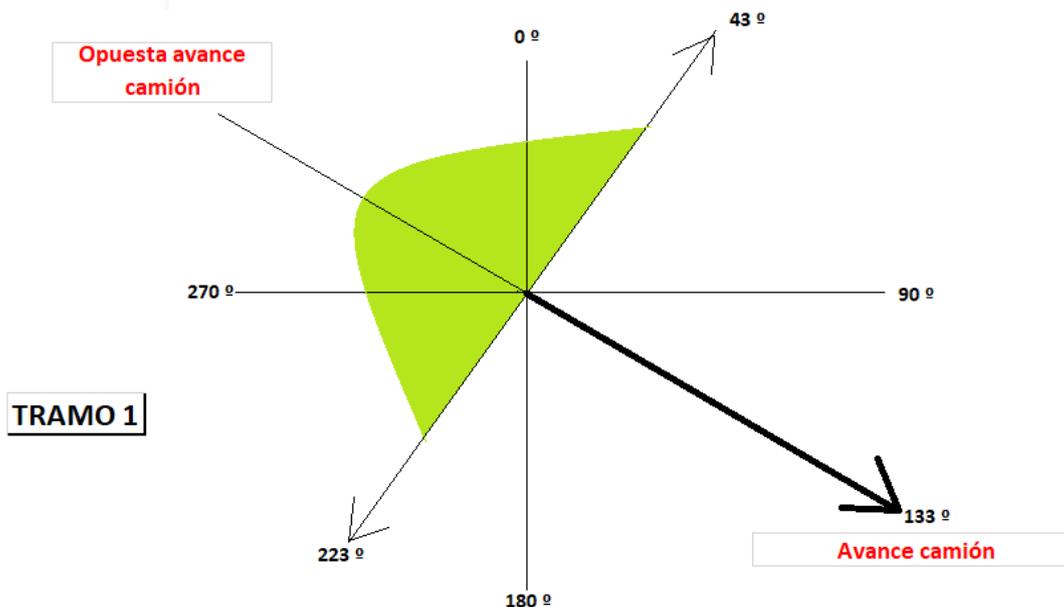


Imagen 12. Rango de ángulos de dato de viento válido para el cálculo de la resistencia aerodinámica en el tramo 1. Fuente: propia

4. Metodología de análisis

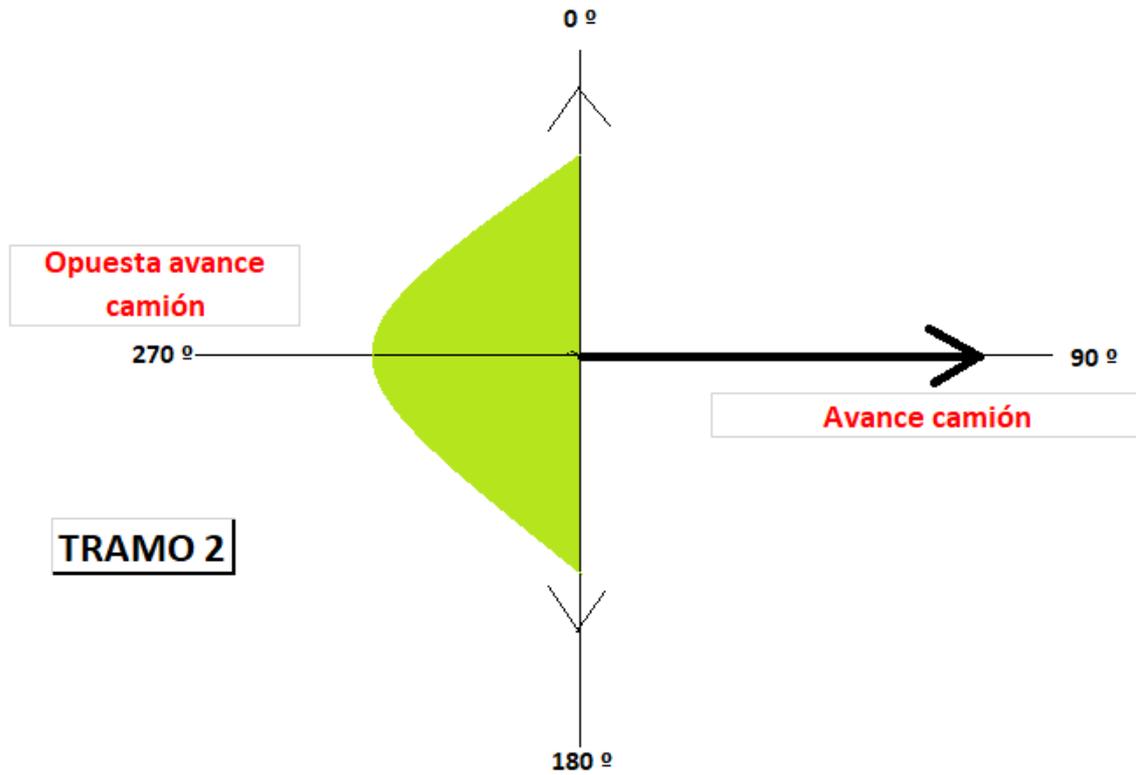


Imagen 13. Rango de ángulos de dato de viento válido para el cálculo de la resistencia aerodinámica en el tramo 2.
Fuente: propia.

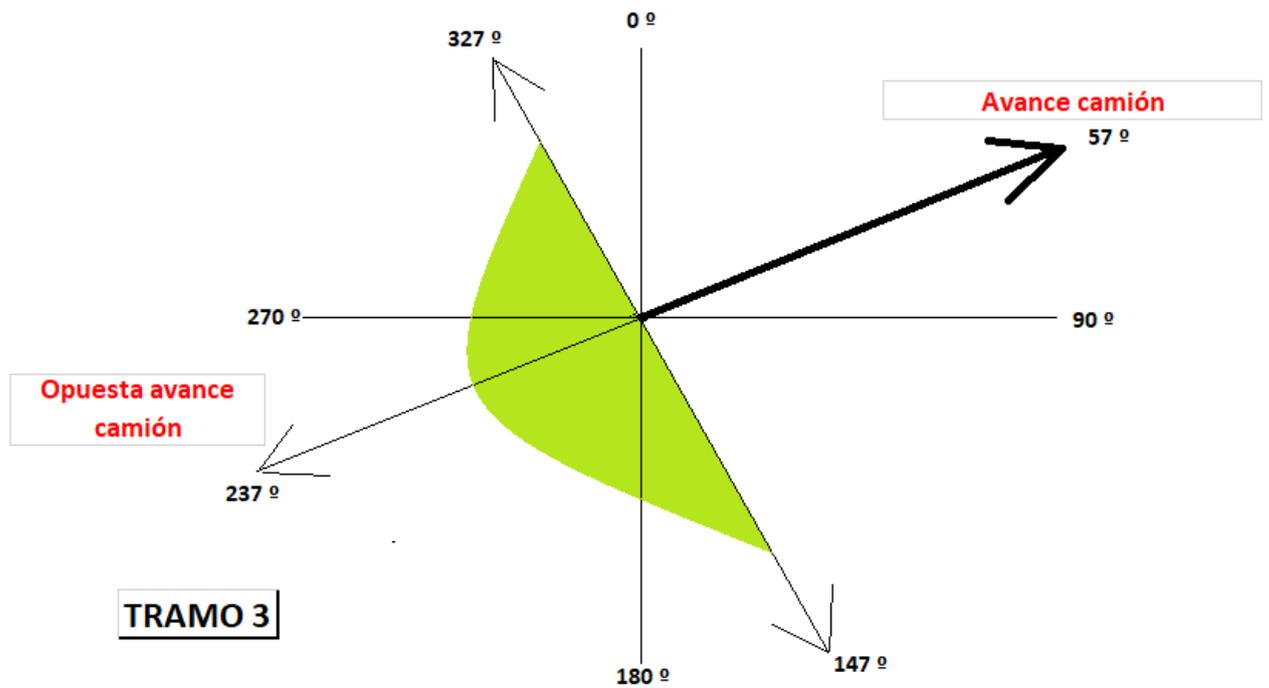


Imagen 14. Rango de ángulos de dato de viento válido para el cálculo de la resistencia aerodinámica en el tramo 3.
Fuente: propia.

4. Metodología de análisis

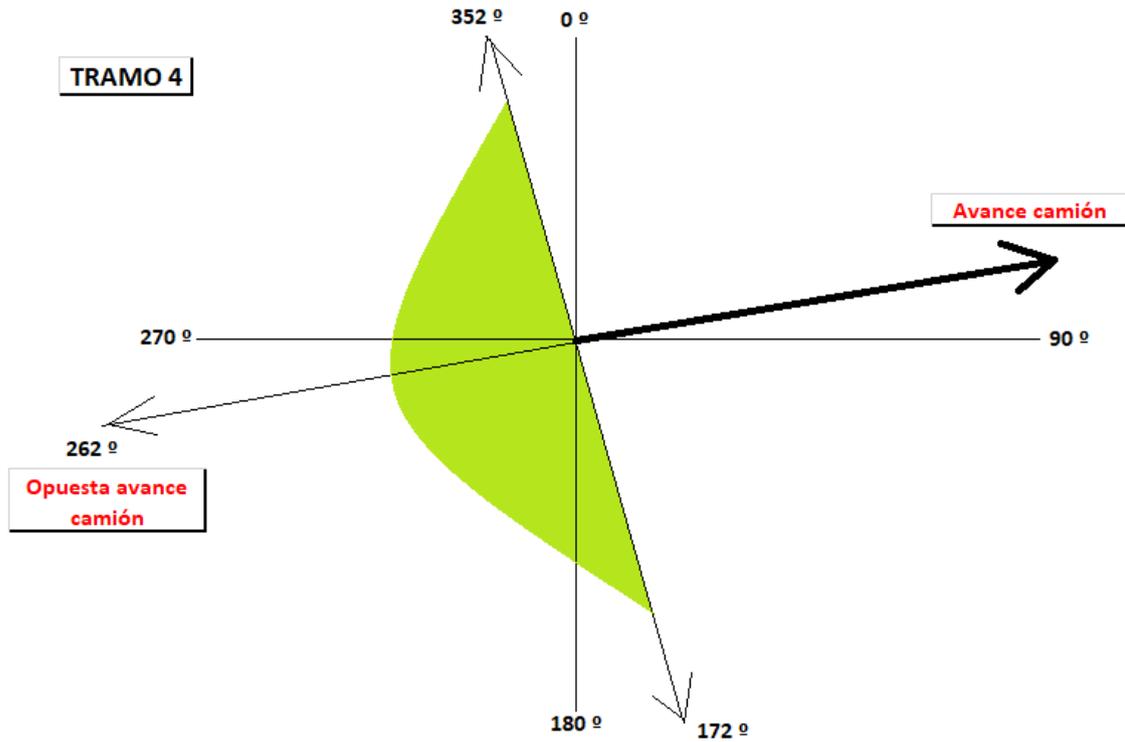


Imagen 15. Rango de ángulos de dato de viento válido para el cálculo de la resistencia aerodinámica en el tramo 4. Fuente: propia.

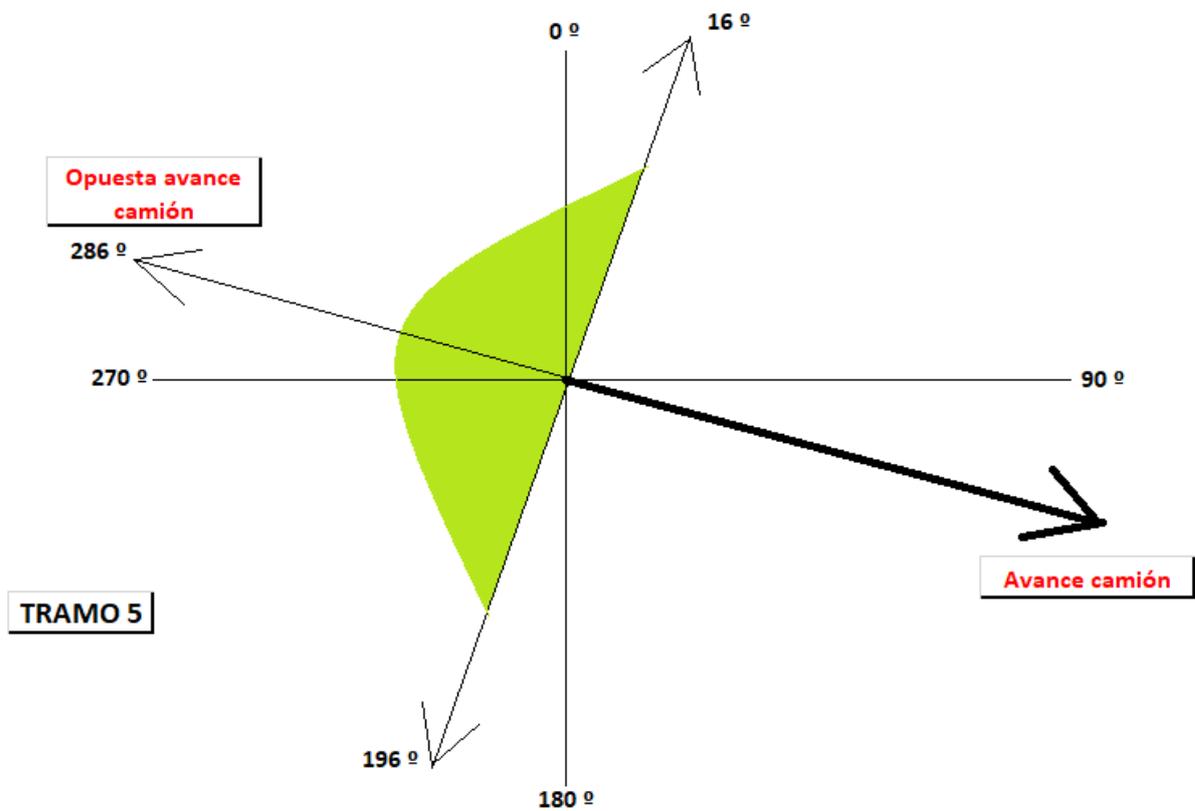


Imagen 16. Rango de ángulos de dato de viento válido para el cálculo de la resistencia aerodinámica en el tramo 5. Fuente: propia.

En los casos que el ángulo del dato de viento en el tramo e instante correspondiente no estuviera dentro de la zona verde, este se consideraría que no contribuye a la resistencia aerodinámica.

Todos los cálculos de resistencia aerodinámica en cada uno de los instantes que nos proporciona datos el CAN bus del camión se han recogido en el anexo III. Para realizar estos cálculos se ha utilizado la ayuda de una hoja de Excel. Con objeto de conseguir el dato de viento correcto en cada instante que le estaba influenciando al camión nos hemos servido de 2 condicionales.

1. Condición de tiempo correcta: Dato horario de viento de cada estación correspondiente a cada dato horario del CAN bus.
2. Condición de tramo y zona de influencia: Dato de tramo (coordenadas) en cada instante proporcionado por el CAN bus correspondiente a dato de viento en la zona de influencia de la estación.

Es decir, una vez que tenemos asignados todos los valores de dato de viento que hacía en cada estación para cada registro horario del CAN bus, el siguiente paso ha sido mediante las coordenadas del CAN bus, relacionarlo con el rango de coordenadas de influencia de cada estación para ver cual le estaba afectando en ese momento. Posteriormente ya con el dato de viento correcto en cada instante se ha llevado a cabo la metodología anteriormente explicada para introducir el valor correcto de velocidad de viento frontal en la fórmula de resistencia aerodinámica.

4.2.4 Cálculo de la resistencia a la inercia (R_i)

La inercia del camión también supone una resistencia al avance. Esto es debido a que la inercia es aquella propiedad que tiene un cuerpo de permanecer en su estado ya sea de reposo o movimiento.

Es decir, cuando se circula a una determinada velocidad y se quiere acelerar, es necesario que la fuerza generada por el motor venza a la resistencia de la inercia.

Por lo tanto, el principio de la inercia, conocido como la Primera Ley de Newton, afirma que los cuerpos tenderán a conservar su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme hasta que se aplique sobre ellos una fuerza externa capaz de vencer dicha resistencia, que se denomina como anteriormente dijimos, fuerza inercial. En este trabajo esta fuerza se ha calculado mediante la siguiente fórmula:

$$F = m \cdot a$$

Siendo:

m [kg] = masa del camión (41500 kg).

a [m/s^2] = aceleración del vehículo.

Se ha calculado la resistencia de inercia en cada instante que nos proporciona el CAN bus, siendo la aceleración proporcional a la ganancia de velocidad entre el dato del CAN bus donde se ha calculado la fuerza y el anterior registro.

Esta resistencia a la inercia se ha calculado únicamente cuando la aceleración es positiva, cuando es negativa no se considera que contribuye a la resistencia total. Es decir, una fuerza de inercia negativa no supone un decremento de la resistencia y por lo tanto del consumo de combustible. Cuando esta fuerza es negativa su contribución por lo tanto a la resistencia total es 0.

La fuerza de inercia será considerablemente alta cuando el camión necesite alcanzar la velocidad de crucero tras parar en los peajes y estaciones de servicio que hay a lo largo de la ruta. Mas adelante se podrá comprobar esto gráficamente.

Por lo tanto, la resistencia total que deberá vencer el Duo trailer en todo momento será la proporcionada por la suma de los 4 diferentes tipos de resistencia anteriormente comentado según la fórmula:

$$R_t = R_r + R_p + R_a + R_i$$

4.3 Caracterización de la ruta mediante el factor de impedancia o tráfico

Uno de los factores que también influye en el consumo de combustible es evidentemente el tipo de conducción. Aunque este factor en ciudad influye considerablemente, en autopista se reduce hasta prácticamente ser despreciable. En este trabajo y considerando que el vehículo objeto de estudio no da mucho margen a distintos tipos de conducción, debido al gran peso y dimensiones, se ha considerado nulo.

Sin embargo, sí que se ha tenido en cuenta la influencia que tiene el tráfico en el consumo. Un día con mucho tráfico va a provocar un aumento de Diesel debido a las constantes deceleraciones y aceleraciones que el resto de los vehículos en la ruta provoca en el camión. Un día sin tráfico por lo tanto tendrá el efecto contrario, no se apreciará un incremento de combustible debido a que el camión va a llevar una velocidad prácticamente constante a lo largo de la ruta.

Se ha calculado este factor de impedancia solo cuando el camión circula a más de 75 Km/h. No se han considerado valores inferiores ya que a velocidades menores se considera que el vehículo se encuentra saliendo o entrando de peajes o estaciones de servicio, donde el tráfico no influye en las distintas variaciones de velocidades que nos proporciona el CAN bus. A velocidades mayores de 75 km/h lo que se ha hecho es calcular el valor absoluto de la diferencia de datos de velocidad entre registros consecutivos del CAN bus. Posteriormente se ha calculado su media a lo largo de la ruta.

4. Metodología de análisis

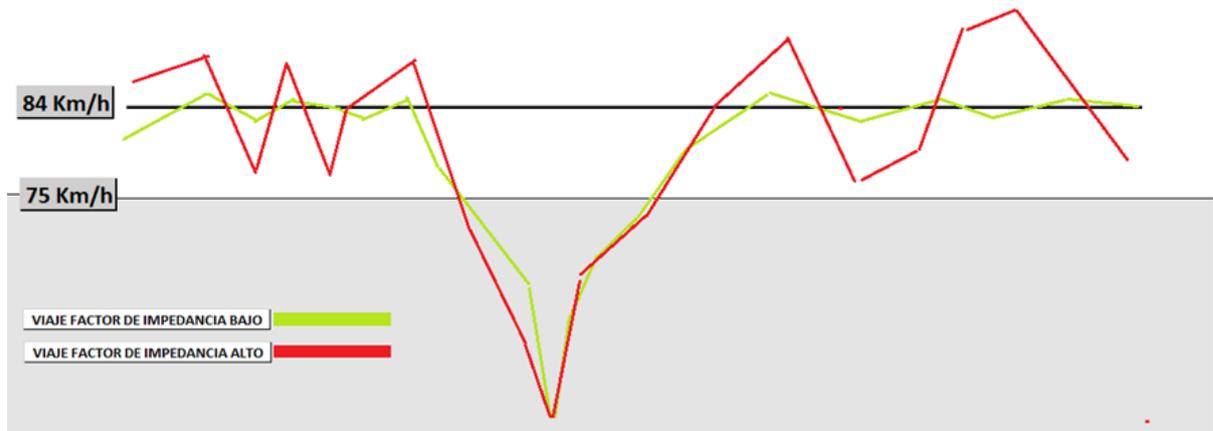


Imagen 17. Ejemplo de dos tipos de viaje con diferente factor de impedancia. Fuente: propia.

En la imagen 17 se puede ver un ejemplo gráfico para 2 viajes distintos en la que la velocidad media del vehículo ha sido la misma, pero se observa que la diferencia de velocidades entre registros consecutivos del CAN bus es muy diferente.

El viaje cuya línea es verde no ha sufrido casi acelerones y frenazos debido a la prácticamente ausencia de tráfico. Mientras que, en la línea roja, que caracteriza la velocidad del viaje con más tráfico, se puede ver que se han realizado más variaciones de velocidad a lo largo de la ruta, provocando un mayor factor de impedancia y por lo tanto de consumo de combustible.

Este valor es representativo de la estabilidad en la velocidad cuando el camión se encuentra a velocidad de crucero. A mayor factor de impedancia, más tráfico y viceversa. No se ha tenido en cuenta en cálculos de consumo de Diesel ya que este factor iría incluido implícitamente en la resistencia de inercia, aunque este tipo de resistencia también tiene en cuenta la entrada y salida de estaciones de servicio y peajes.

Por lo tanto, este factor de impedancia o tráfico se ha calculado únicamente con la idea de caracterizar el viaje lo más posible, añadiéndole condiciones reales en carretera.

4.4 Descomposición puntual de la ruta

El principal problema del análisis de la ruta ha sido la diferente ubicación que nos proporcionan los registros del CAN bus a lo largo de los 263,1 km de estudio en cada uno de los 18 viajes analizados. Hay viajes en los cuales tenemos más de 130 registros, mientras que en otros viajes este número se reduce hasta los 80. El CAN bus no da datos con el mismo intervalo de tiempo, su funcionamiento es aleatorio y los intervalos pueden llegar a ser desde 20 segundos a 4 minutos. Por lo que supone un problema al querer comparar viajes con distinto números de datos en posiciones diferentes.

La solución que se ha escogido es la siguiente: Se ha elegido como base de descomposición de la ruta en puntos la que nos ha proporcionado Google earth

4. Metodología de análisis

cuando hemos querido calcular la resistencia a la pendiente. Mediante interpolación se han pasado los datos del CAN bus de cada viaje a cada uno de los 867 puntos distribuidos a lo largo de los 263,1 km, esto nos permite comparar resultados entre distintos viajes gráficamente. No solo gráficamente, sino que también permite comparar resultados de resistencia en los mismos puntos que de otra manera y teniendo en cuenta únicamente los datos del CAN bus sería imposible.

Otro problema a la hora de caracterizar los viajes ha sido el principio y el fin de estos. Como se ha explicado anteriormente, se han elegido dos puntos de comienzo y finalización de la ruta. Pero ni el primer dato del CAN bus coincide exactamente con las coordenadas de inicio de la ruta (41.678109444444 - 0.852173361111111) ni el último con las coordenadas de final de la ruta (41.5352745 1.861690000). En este caso la solución ha sido también la interpolación de datos entre el registro inmediatamente anterior y posterior a las coordenadas de inicio y fin de la ruta. Con esto lo que se consigue es tener datos desde el origen (0 km) hasta el final de la ruta (263,1 km). Sin estas interpolaciones hubiéramos tenido distintas longitudes de estudio entre los distintos 18 viajes dependiendo de la ubicación del primer y último registro en la ruta que nos hubiera dado el CAN bus.

En la imagen 18 se puede ver un ejemplo de interpolación entre registros del CAN bus anteriores y posteriores tanto al inicio con al final de la ruta. Sin esta interpolación y en este ejemplo en concreto, que corresponde con el viaje 18, se puede comprobar que la longitud total de la ruta analizada hubiera sido de 258 km (260,6 km - 2,6 km). Lo que estaría falseando los resultados al compararlos con otros viajes de otras longitudes totales.

	Resit. Aero	vel camión	vel viento	vel total	vel camión			
1	2475,749528 N	25,14 m/s	0,00 m/s	25,14 m/s	90,5 Km/h	28/06/2019 14:58:20	-5,00 Km	x0
INICIO	2439,953202 N	24,96 m/s	0,00 m/s	24,96 m/s	89,84 Km/h	28/06/2019 15:01:38	0,00 Km	x
2	2421,339112 N	24,86 m/s	0,00 m/s	24,86 m/s	89,50 Km/h	28/06/2019 15:03:21	2,60 Km	x1

	Resit. Aero	vel camión	vel viento	vel total	vel camión			
1	2078,321965 N	22,92 m/s	0,12 m/s	23,03 m/s	82,50 Km/h	28/06/2019 18:08:39	260,60 Km	x0
FIN	1876,192533 N	21,74 m/s	0,12 m/s	21,85 m/s	78,3 Km/h	28/06/2019 18:10:11	263,10 Km	x
2	1674,063101 N	20,56 m/s	0,12 m/s	20,67 m/s	74,0 Km/h	28/06/2019 18:11:44	265,60 Km	x1

Imagen 18. Interpolación entre los puntos anteriores y posteriores al inicio y final de la ruta. Fuente: propia.

Por lo tanto, con la primera interpolación de datos lo que se consigue es tener para cada uno de los 18 viajes la misma cantidad de datos (867) en los mismos puntos a lo largo de la ruta y con la segunda interpolación de datos se consigue tener registros exactamente al inicio y final de ruta.

4.5 Cálculo del consumo de Diesel y emisiones de CO₂

El ahorro de combustible es el principal reto al que se enfrentan muchas empresas del mundo del transporte. Buena parte del presupuesto del negocio se destina a carburante, por lo que hacer un estudio de los factores que lo incrementa es la mejor forma de aumentar los beneficios de una forma significativa. En este trabajo se ha calculado de la siguiente manera:

A partir de la resistencia total a la que ha sido sometida el camión a lo largo de la ruta se calcula el consumo de Diesel y las emisiones de CO₂. Para calcular el consumo lo primero que habrá que hacer será calcular la energía total que el motor necesita suministrar a lo largo de la ruta.

La energía que el motor deberá entregar (W) será la suma de las 4 resistencias en cada uno de los 867 puntos de la ruta (F) multiplicada por la distancia recorrida (D), esta distancia es la que hay entre cada uno de los 867 puntos.

$$W [J] = F [N] \cdot D [m]$$

Sin embargo, la energía real que el motor tiene que suministrar deberá tener en cuenta el rendimiento de este debido a las pérdidas que se producen a lo largo del sistema de transmisión. En este trabajo hemos considerado un rendimiento del 65%.

$$W \text{ real } [J] = W [J] / 0,65$$

Una vez se tiene la energía que el motor ha suministrado a lo largo de la ruta teniendo en cuenta también el rendimiento de este, el siguiente paso es mediante su poder calorífico inferior (43,1 MJ/kg) de la tabla 6, recogido en el informe JRC [8], calcular el consumo de litros de Diesel total del viaje.

La densidad del Diesel es 0,832 g/cm³ a 15°C según el reporte de CEPSA [9]. Por lo que, multiplicando 43,1 MJ/kg por la densidad nos da el poder calorífico inferior en MJ/l, en este caso 35,86 MJ/l. Posteriormente para calcular el consumo de litros de Diesel total se dividirá la energía total suministrada a lo largo de la ruta por 35,86 MJ/l. Dividiendo el resultado entre los kilómetros del viaje y multiplicando por 100, nos dará el consumo de litros de Diesel cada 100 kilómetros.

Hoy en día la reducción de las emisiones de CO₂ de las empresas de transporte ha adquirido gran importancia. Las empresas se arriesgan a sanciones por parte de la UE si no reducen sus emisiones un 30% en 2030 respecto a los niveles de 2019, por lo que conocer los factores que las incrementan y como reducirlas es de vital importancia. En este trabajo se han calculado de la siguiente manera:

Para calcular las emisiones de CO₂ a lo largo de la ruta se tendrá que multiplicar la energía total suministrada por el motor por 73,25 g/MJ, lo que nos dará los gramos totales de CO₂ emitidos a la atmósfera.

4. Metodología de análisis

Tabla 6. Propiedades de los combustibles. Fuente: R. Edwards. (2011). *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Fuel		Density kg/m ³	LHV MJ/kg	Carbon %m	CO ₂ emissions	
					kg/kg	g/MJ
Gasoline	2002	750	42.9	87.0%	3.19	74.35
	2010	745	43.2	86.5%	3.17	73.38
Ethanol		794	26.8	52.2%	1.91	71.38
Gasoline/Ethanol blend 95/5	2002	752	42.1	85.2%	3.12	74.25
	2010	747	42.3	84.6%	3.10	73.31
MTBE ⁽¹⁾		745	35.1	68.2%	2.50	71.23
ETBE ⁽¹⁾		750	36.3	70.6%	2.59	71.40
LPG ⁽²⁾		550	46.0	82.5%	3.02	65.68
CNG/CBG ⁽³⁾			45.1	69.2%	2.54	56.24
Diesel	2002	835	43.0	86.2%	3.16	73.54
	2010	832	43.1	86.1%	3.16	73.25
Bio-diesel ⁽⁴⁾		890	36.8	76.5%	2.81	76.23
Diesel/bio-diesel blend 95/5	2002	838	42.7	85.7%	3.14	73.66
	2010	835	42.8	85.6%	3.14	73.39
Synthetic diesel		780	44.0	85.0%	3.12	70.80
DME ⁽⁵⁾		670	28.4	52.2%	1.91	67.36
Naphtha		720	43.7	84.9%	3.11	71.22
Methanol		793	19.9	37.5%	1.38	69.10
Hydrogen			120.1	0.0%	0.00	0.00

⁽¹⁾ Methyl (Ethyl) -Tertiary-Butyl Ether

⁽²⁾ Liquefied Petroleum Gas

⁽³⁾ Compressed Natural Gas / Compressed Bio Gas

⁽⁴⁾ Figures are for FAME (Fatty Acid Methyl Ester), more specifically RME (Rape seed Methyl Ester)

⁽⁵⁾ Di-Methyl-Ether

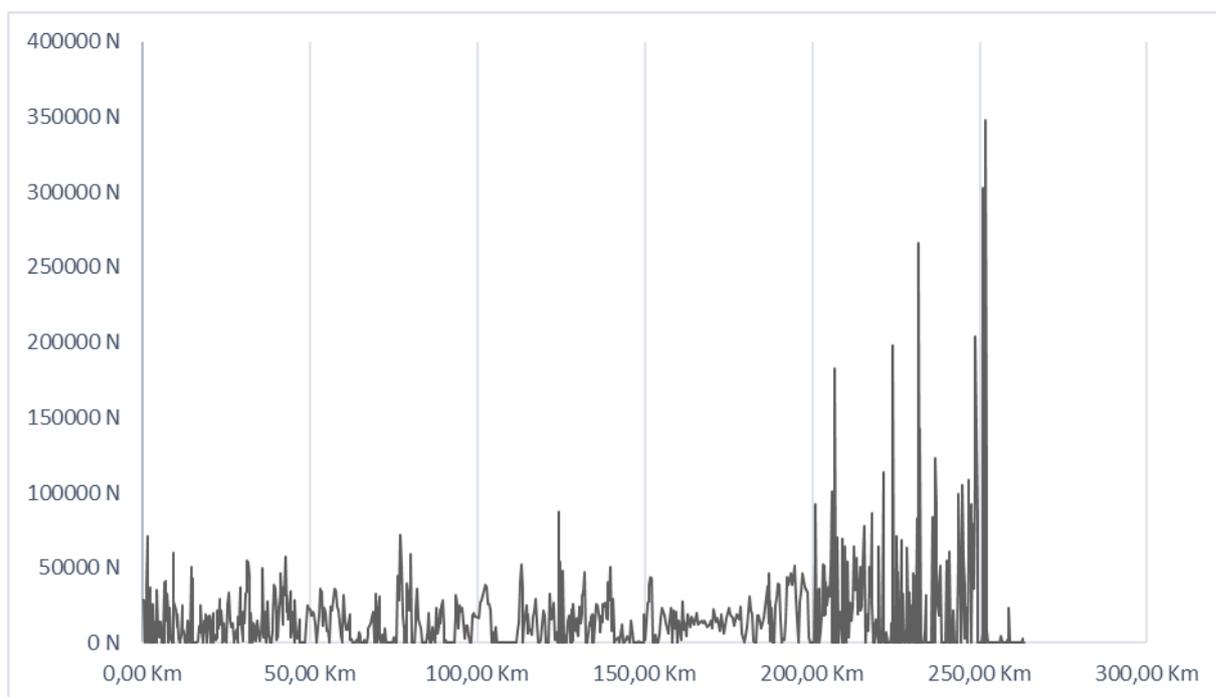
5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO₂

A partir de los cálculos realizados en cada uno de los 18 viajes estudiados de acuerdo a la metodología anteriormente expuesta, se puede comprobar la influencia que el viento tiene sobre el camión, en consumo y por lo tanto en emisiones de CO₂. Se comprobará tanto la relación de la velocidad del viento con la resistencia aerodinámica, como la diferencia de valores entre diferentes viajes.

5.1 Análisis del efecto de las distintas resistencias al avance del vehículo en el viaje 1

Antes de ver la influencia del viento en la resistencia aerodinámica se comprobará como se relacionan el resto de variables como la resistencia a la pendiente o la de inercia. En concreto se va a analizar primero el viaje número 1.

En la gráfica 3 se puede ver la resistencia que el motor ha tenido que vencer a lo largo de los 263,1 km de estudio. Es resultado de la suma de la resistencia aerodinámica, de inercia, a la pendiente y de rodadura. Teniendo en cuenta un rendimiento del motor del 65%.



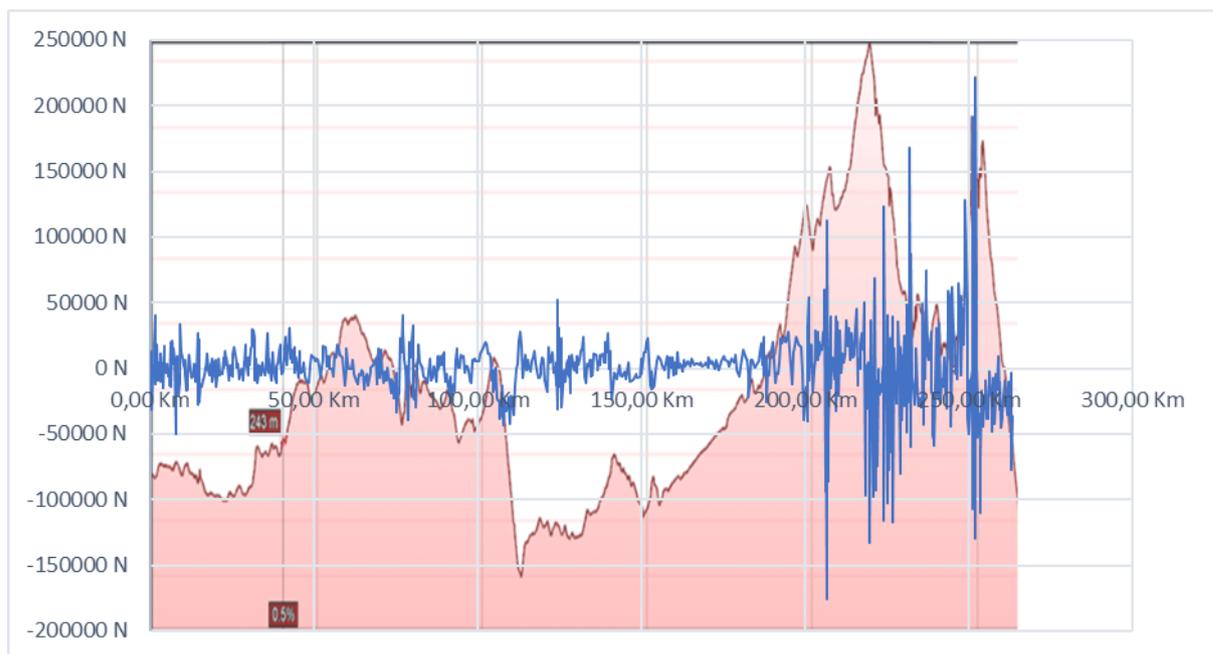
Gráfica 3. Resistencia total vencida por el motor en la ruta Zaragoza – Martorell. (viaje 1). Fuente: propia.

Mientras que en la primera parte de la ruta la curva es estable, en la parte final se puede apreciar un incremento considerable de la resistencia. Esto se debe a las pendientes pronunciadas por las que el camión debe circular una vez se aproxima a Martorell, esto se puede comprobar en la gráfica 4. En esta gráfica la imagen de fondo de color rosa representa el perfil de altura de la ruta y la curva de color azul es la resistencia a la pendiente a lo largo del viaje. Se puede

comprobar por lo tanto que la mayor variación de pendiente según el perfil de altura corresponde con los picos de resistencia de la curva azul.

Se han considerado resistencias negativas cuando el camión está circulando por pendientes descendentes ya que se considera opuesta al movimiento del vehículo, aunque no suponga un decremento del consumo. Es decir, si el camión va cuesta abajo por una bajada muy pronunciada, mientras que la suma del resto de resistencias que se oponen al avance no fueran mayores que la resistencia a la pendiente negativa, el camión no va a experimentar consumo. Por lo tanto, en este caso en concreto, se va a considerar nula la resistencia que el motor tiene que vencer. Si se considerara negativa (la resistencia total) estaríamos suponiendo que hay un decremento en el consumo de Diesel, algo físicamente imposible. Por lo que en ese intervalo la resistencia que tendrá que vencer el motor será igual a 0 y el consumo nulo.

La gráfica 4 corresponde a cada uno de los 18 viajes, no únicamente al número 1, ya que esta resistencia a la pendiente depende del peso del camión y de las pendientes a lo largo de la ruta, que son las mismas independientemente del viaje. El peso del camión como se ha expuesto anteriormente también es el mismo para todos los viajes e igual a 41500 kg.



Gráfica 4. Resistencia a la pendiente en la ruta Zaragoza – Martorell. Área rosa: perfil de altura de la ruta. Curva azul: resistencia a la pendiente. Fuente: propia.

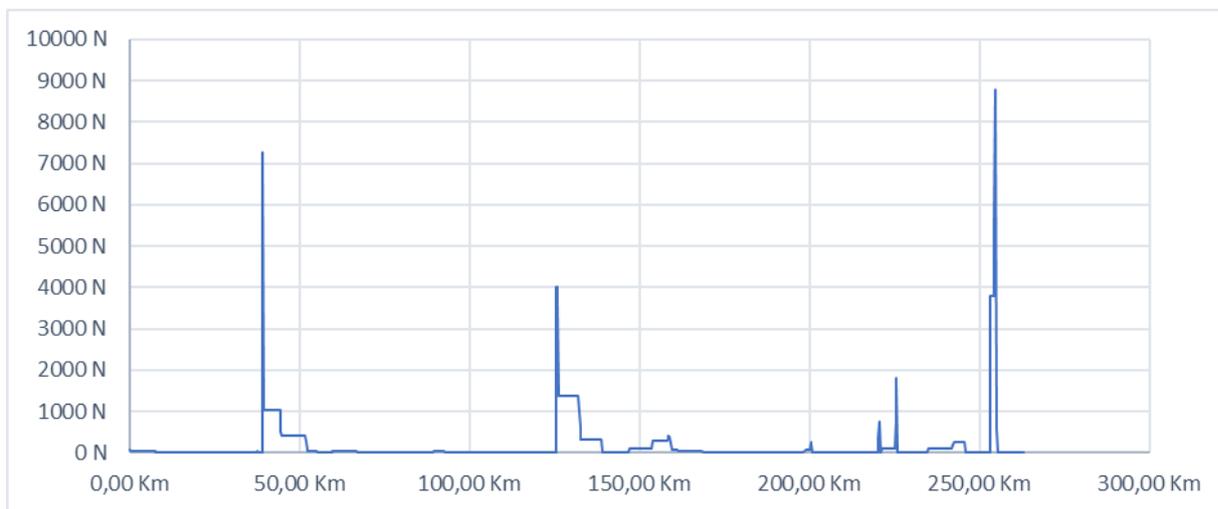
Otro de los factores a estudiar es la resistencia por inercia a la que el camión está siendo sometida. Esta resistencia ocurre cuando cambia la velocidad, generando una fuerza que se opone al movimiento del vehículo. Se ha considerado solo cuando la aceleración es positiva, cuando es negativa no provoca un decremento de combustible ya que sería físicamente imposible. Esto se puede comprobar en las gráficas 5 y 6. Solo cuando el camión está acelerando se produce resistencia por inercia. Por lo tanto, los picos positivos de aceleración que se ven en la gráfica 6 corresponden con los picos de resistencia

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO₂

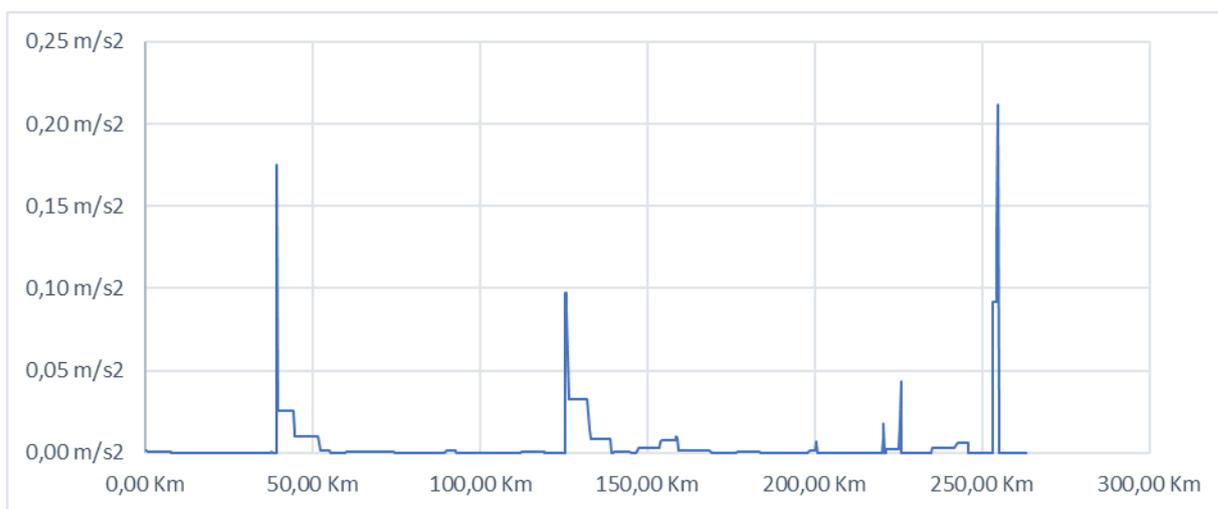
de inercia de la gráfica 5. Son proporcionales y si se hubieran puesto en la misma gráfica se vería que se solapan, por eso se ha decidido mostrarlo en dos diferentes.

Otro punto a estudiar en estas dos gráficas son los 3 valores tan altos de resistencia que está dando a lo largo de la ruta. Esto se debe a paradas en peajes y estaciones de servicio. En concreto en este caso (viaje número 1) el primer pico corresponde al peaje de la AP-2 ubicado en las coordenadas (41.5258445833333 -0.466069972222222) y el segundo pico es debido a otra parada en el peaje de acceso a la A2 con coordenadas (41.5359268055556 0.476675000000000).

El último gran valor de resistencia de inercia que se ve en la gráfica 5 es debido a un aumento puntual de tráfico en esa zona que hace bajar la velocidad del camión hasta los 58 km/h. El resto de pequeñas variaciones de esta resistencia se debe a que el camión no lleva una velocidad totalmente constante a lo largo de los 263,1 km.



Gráfica 5. Resistencia de inercia a lo largo de la ruta Zaragoza – Martorell en el viaje 1. Curva azul: resistencia a la inercia. Fuente: propia.

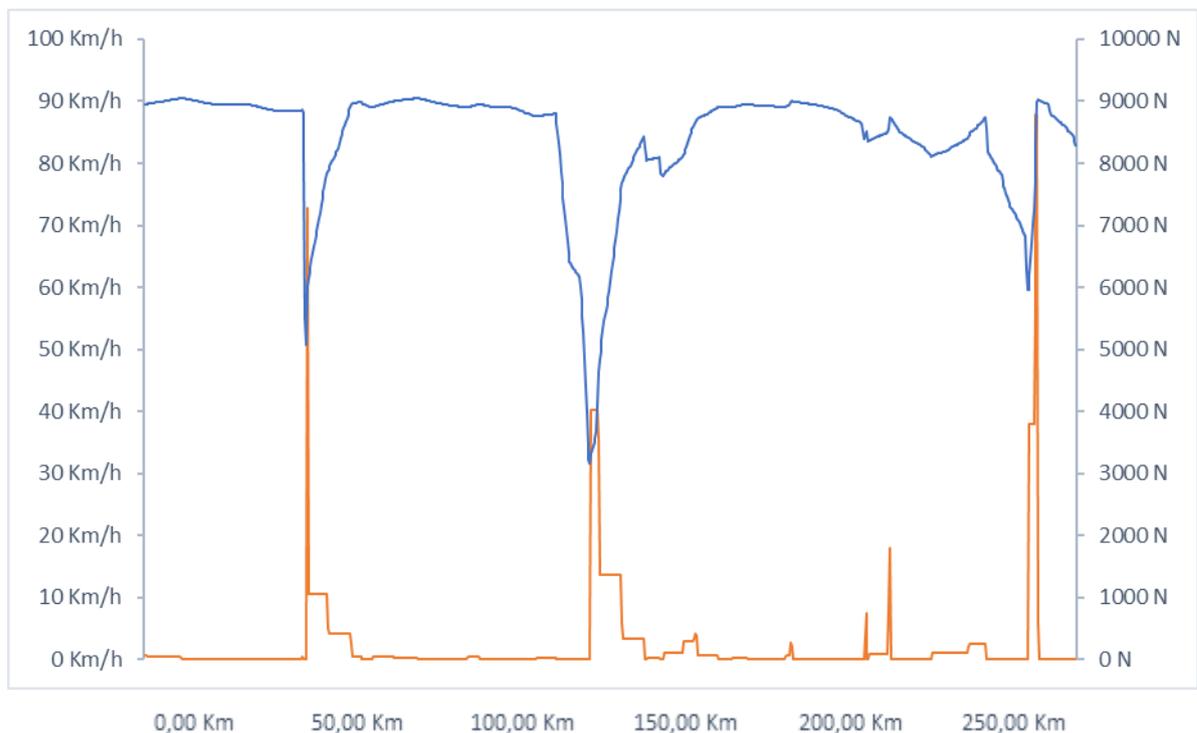


Gráfica 6. Aceleración a lo largo de la ruta Zaragoza – Martorell en el viaje 1. Curva azul: aceleración vehículo. Fuente: propia.

Cuando el camión se reincorpora a la carretera tras parar en un peaje o estación de servicio, la resistencia de inercia que le afecta es enorme comparada con cualquier otra situación del viaje. Recordemos que la fórmula es:

$$F = m \cdot a$$

Siendo un camión de más de 40 toneladas y aceleraciones máximas de entre $0,1 \text{ m/s}^2$ y $0,2 \text{ m/s}^2$ se pueden explicar los picos de más de 7000 N que se aprecian en la gráfica 5.



Gráfica 7. Velocidad del camión y resistencia de inercia a lo largo de la ruta Zaragoza - Martorell en el viaje 1. Curva naranja: resistencia a la inercia. Curva azul: velocidad del camión. Fuente: propia.

En la gráfica 7 se puede ver comparada la velocidad del camión con la resistencia de inercia. Se puede comprobar que los valores altos de resistencia corresponden a cuando la velocidad del camión está aumentado al incorporarse a la carretera después de las paradas en los peajes.

Como se ha dicho anteriormente se producen 2 paradas en peajes en este viaje número 1. En esos dos puntos la velocidad de los registros del CAN bus tendrían que haber sido igual a 0 km/h, pero sin embargo se observa que los datos de velocidad no bajan de 50 km/h en el primer caso y de 30 km/h en el segundo. Esto se debe a que el CAN bus no nos ha proporcionado exactamente el dato cuando el camión estaba parado. Los intervalos entre registros suelen oscilar entre 15 segundos y 4 minutos, es decir, puede ser que el valor de la velocidad de 0 km/h cuando está parado en peaje no se registre. Solo se puede ver que la velocidad decrece hasta llegar a un valor próximo a 0 km/h y vuelve a aumentar hasta alcanzar velocidad de crucero.

Se puede comprobar si efectivamente ha parado en un peaje si en el rango de coordenadas del intervalo entre registros, se encuentran las coordenadas de un

peaje. Cuando el camión para en una estación de servicio el registro del CAN bus sí que suele dar el valor de 0 km/h ya que es un tipo de parada que suele durar más que el tiempo máximo entre intervalos de datos del CAN bus.

El tiempo de pausa en un peaje suele ser inferior al minuto, por lo que es difícil que el registro del CAN bus coincida exactamente con la parada (0 km/h), mientras que las pausas en estaciones de servicio suelen ser mayores de 5 minutos, tiempo mayor que el máximo tiempo entre registros del CAN bus (de 15 segundos a 4 minutos). El resto de las variaciones de velocidad que no encajan con las consideraciones antes expuestas se corresponden con tráfico en el viaje.

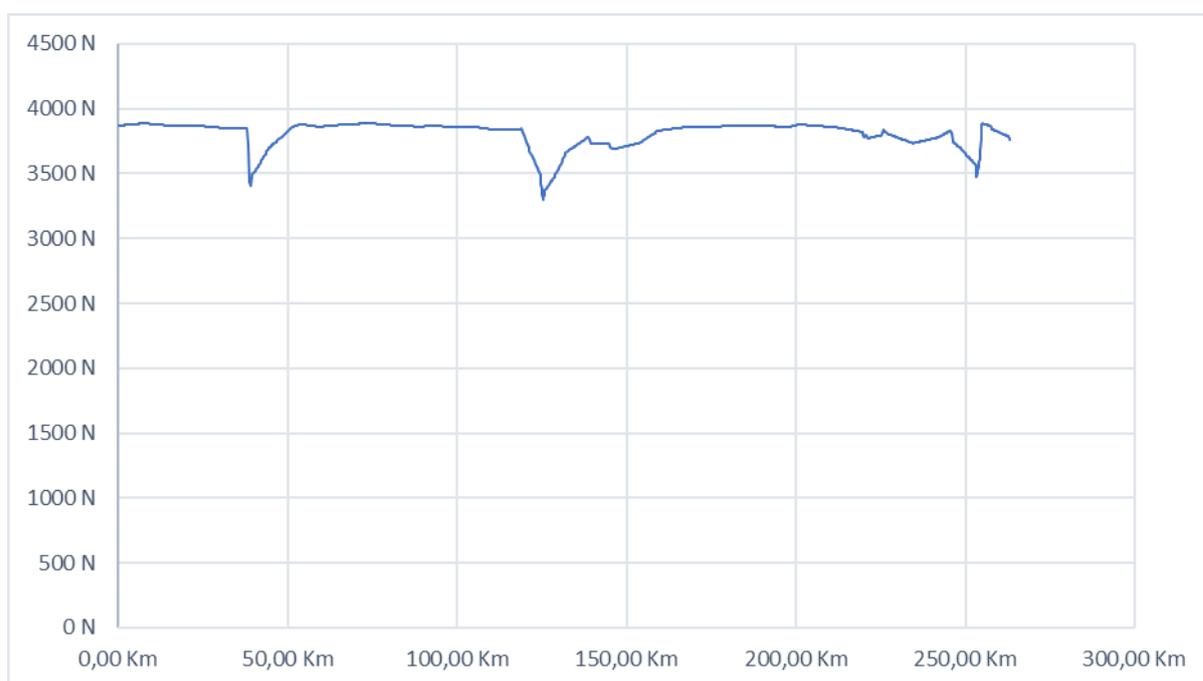
La resistencia a la rodadura es otro punto de estudio en la ruta. Va a ser prácticamente la misma en cada uno de los 18 viajes analizados. Cabe recordar que la resistencia a la rodadura se ha calculado según:

$$R_r(N) = \mu \cdot F_n$$

$$F_n = m \cdot g; g = 9,81 \text{ m/s}^2; m = 41500 \text{ kg};$$

$$\mu = (0,008 + 0,002((v \text{ [km/h]} / 100)^{2,5}))$$

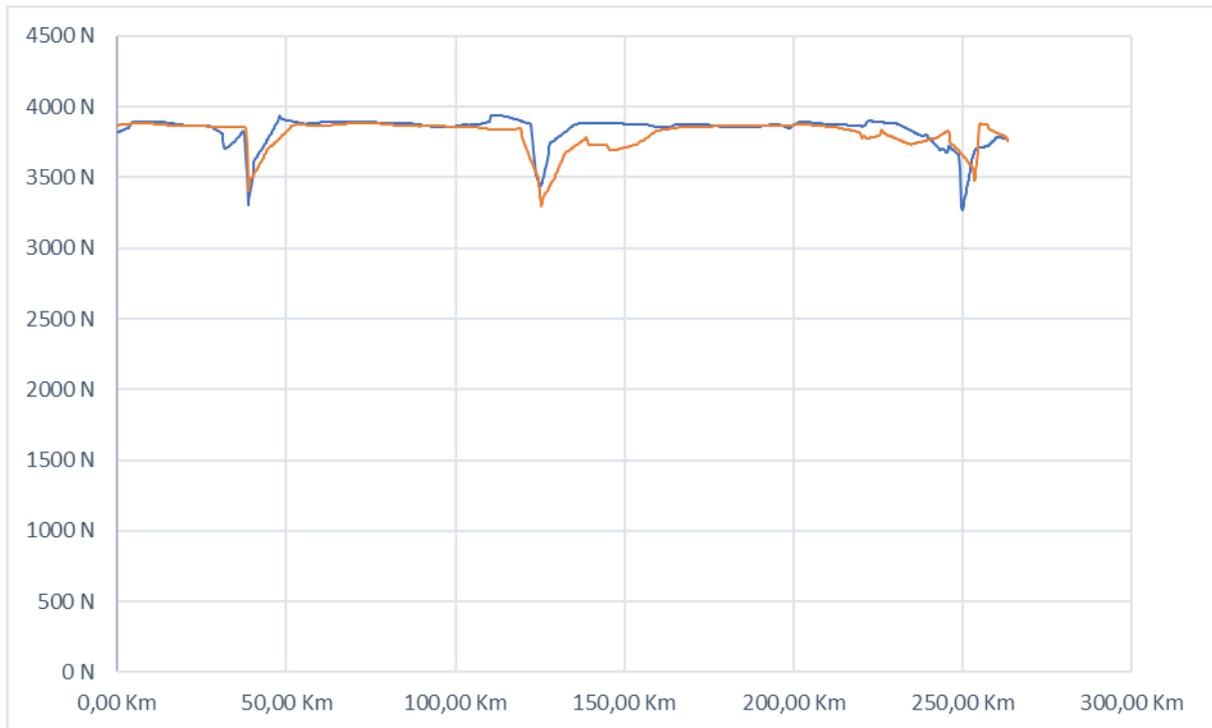
La gráfica 8 por lo tanto será muy parecida en cada uno de los 18 viajes.



Gráfica 8. Resistencia a la rodadura en la ruta Zaragoza – Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia a la rodadura. Fuente: propia.

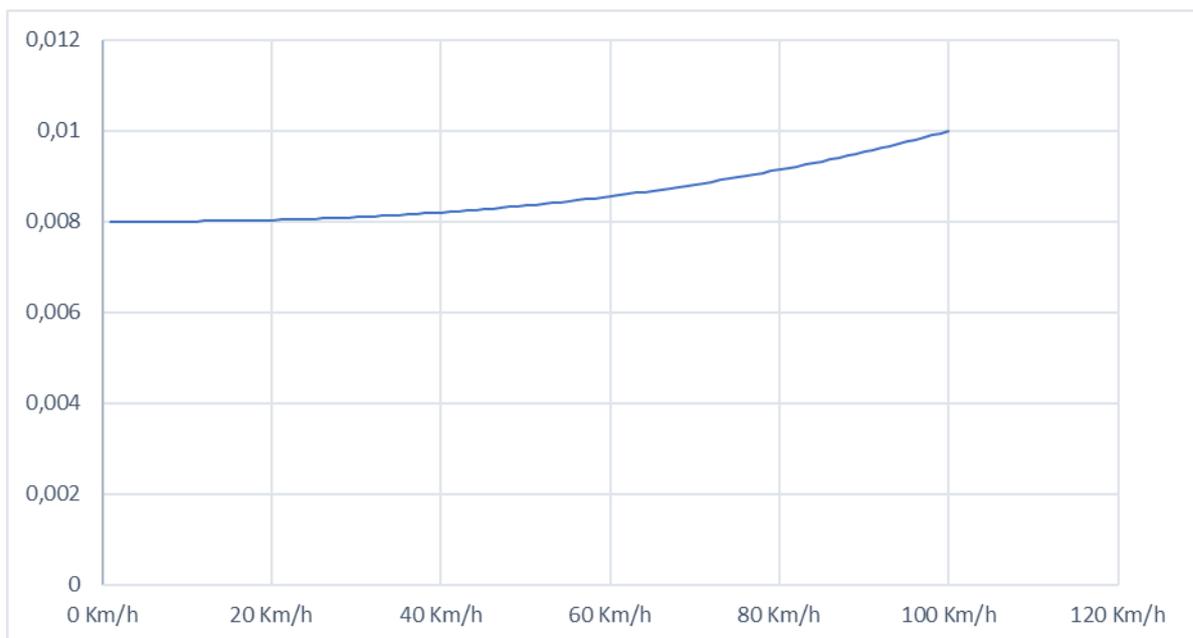
Se puede comprobar que a velocidad de crucero la resistencia a la rodadura es prácticamente constante debido a que el coeficiente de rozamiento no sufre casi variación. Únicamente cuando reduce su velocidad para parar en peajes o estaciones de servicio se puede apreciar una pequeña disminución.

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO2



Gráfica 9. Comparativa entre la resistencia a la rodadura en los viajes 1 y 2. Curva naranja: resistencia a la rodadura en el viaje 1. Curva azul: resistencia a la rodadura en el viaje 2. Fuente: propia.

En la gráfica 9 se puede ver la comparación de resistencia a la rodadura entre el viaje 1 y el 2. Como se exponía anteriormente, la gráfica resulta ser muy parecida entre distintos viajes. Esto se debe a que el peso es el mismo en todas las situaciones analizadas y que las variaciones del coeficiente de rodadura es mínimo ante variaciones de velocidad. Esta variabilidad del coeficiente de rodadura en función de la velocidad mediante la anterior expresión se puede ver en la gráfica 10.



Gráfica 10. Coeficiente de rodadura en función de la velocidad del vehículo. Curva azul: coeficiente a la rodadura. Fuente: propia.

5.2 Análisis del efecto de la velocidad del viento en carretera en la resistencia aerodinámica en el viaje 1

Por último, quedaría por analizar los resultados de resistencia aerodinámica en el viaje número 1. Este punto es el objeto del trabajo, conocer cómo afecta el viento a la resistencia aerodinámica y total es fundamental para determinar técnicas de conducción que permitan una reducción de esta y por lo tanto del consumo y emisiones de CO₂.

En el viaje 1 la resistencia aerodinámica a lo largo de la ruta ha sido la que se ha reflejado en la gráfica 10.



Gráfica 11. Resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia aerodinámica. Fuente: propia.

En la gráfica 11 se ven numerosas variaciones de los valores de resistencia aerodinámica a lo largo de la ruta, esto se debe a numerosos factores, por lo que analizarla individualmente y sin tener en cuenta las variables sería imposible.

Como se ha comentado anteriormente la fórmula de resistencia aerodinámica depende de 5 términos:

- Densidad del aire
- Velocidad del vehículo
- Velocidad del viento
- Área frontal del vehículo
- Coeficiente aerodinámico

A medida que baja la temperatura, aumenta la densidad del aire, lo que aumenta la resistencia al avance. Pero en este trabajo se ha considerado constante, por lo tanto, la gráfica anterior no se encuentra influenciada por la densidad. El área

frontal del vehículo, así como el coeficiente aerodinámico también se han considerado invariables. Así se puede deducir que únicamente la velocidad del viento y del camión van a ser las causantes de las variaciones de resistencia aerodinámica que se ven en la gráfica 11.

Para estudiar con más detalle la influencia de estas dos variables se ha decidido estudiarlas junto a la resistencia aerodinámica en la gráfica 12. En ella se ha superpuesto a la curva de la resistencia aerodinámica (curva azul) la velocidad del camión (curva gris) y la velocidad del viento (curva naranja).

Hay que recordar que la curva de velocidad del viento no es la velocidad de viento que hizo ese día en la ruta, si no la componente de la velocidad del viento que le afectó frontalmente al camión en ese tramo del viaje. Es decir, un día que hizo mucho viento, pero sin embargo este fue trasero o perfectamente perpendicular a la dirección de avance del vehículo no se ha tenido en cuenta y la curva naranja sería de 0 m/s para todo el viaje. No tendría sentido estar considerando vientos traseros como contribuyentes a la resistencia. La curva naranja por lo tanto es ya la velocidad frontal que le afecta descompuesta.

En la imagen 19 se puede ver con más claridad el significado de la curva naranja de la gráfica 12. El rango de datos de viento que se ha escogido en función del ángulo respecto a la dirección de avance del camión se ha explicado anteriormente en detalle en el capítulo de metodología.

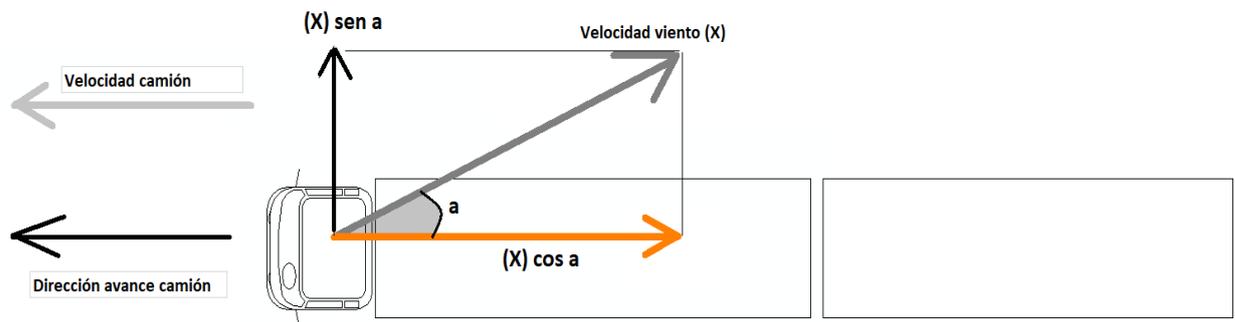


Imagen 19. Descomposición de la velocidad del viento. Fuente: propia.

Una vez explicado el significado de las curvas de la gráfica 12, hay que comentar cada uno de los 7 diferentes tramos que se aprecian a lo largo de recorrido. Estos 7 tramos no se repiten necesariamente en el resto de viajes y son únicos de este en concreto.

- Tramo 1:

En esta parte del recorrido, aproximadamente los primeros 40 kilómetros, se puede ver un valor prácticamente constante de la resistencia aerodinámica. Esto se debe a 2 factores. En primer lugar, la velocidad del camión es fundamentalmente constante debido a una conducción poco agresiva por parte

del conductor y también a la ausencia de tráfico en este tramo. Como se verá más adelante, estos primeros 40 km de la ruta Zaragoza – Martorell por la AP-2 se caracterizan por un tráfico fluido. En caso de ser una zona con tráfico se verían numerosas oscilaciones de la velocidad del camión que provocarían el mismo efecto en la resistencia aerodinámica.

El otro factor que caracteriza esta regularidad de la curva de resistencia es la velocidad del viento. Como se puede ver, la curva naranja no experimenta ningún aumento a lo largo del tramo 1, en todo momento es igual a 0 m/s. Es decir, la velocidad del viento no influye al vehículo en ningún instante. Esto no supone una contribución extra a la velocidad del camión en la expresión de resistencia aerodinámica. En este tramo y al no haber influencia del viento, la regularidad del valor de resistencia lo proporciona la velocidad del camión.

- Tramo 2:

Este tramo está totalmente influenciado por la parada que el camión realiza en el peaje de la AP-2. Como se ha explicado anteriormente el registro del CAN bus no da exactamente el dato de 0 km/h y por lo tanto la curva de resistencia aerodinámica no da el valor de 0 en el tramo 2. En este caso la curva de resistencia cae de la misma manera que lo hace la velocidad del vehículo y por lo tanto también aumenta de igual forma que lo hace la velocidad del camión. La velocidad del viento en esta zona sigue siendo igual que en el tramo 1 e igual a 0, por lo que su contribución a la expresión de la resistencia aerodinámica sigue siendo nula. Aunque en este tramo la velocidad del viento fuera alta, las variaciones de resistencia aerodinámica se deberían fundamentalmente a la variación de velocidad del camión.

La parada en el peaje de la AP-2 es evidentemente obligatoria, por lo que esta caída de resistencia será característica de cada uno de los 18 viajes que se han analizado. No pasa lo mismo con las paradas en estaciones de servicio, donde la parada evidentemente es voluntaria y caracterizará la gráfica de diferente forma en los sucesivos viajes.

- Tramo 3:

Este tramo tiene las mismas características que el primero. El valor de la resistencia aerodinámica es constante y se debe a la velocidad también constante del vehículo. Esto es debido a la ausencia de tráfico y a una conducción suave. En este tramo existe una estación de servicio, en la que como se verá en otros viajes, se suele parar, no ha sido este el caso ya que se ve que la velocidad del camión es prácticamente invariable.

En este tramo tampoco se aprecia un aumento de la velocidad del viento, por lo que su contribución y por lo tanto influencia en la resistencia aerodinámica es

nula. Como sucedió en el primer tramo, la regularidad de valores de resistencia lo proporciona la velocidad del camión.

- Tramo 4:

Esta parte del recorrido está condicionado por la parada que se realiza en el peaje de incorporación a la A2. Como sucedió en el tramo 2, la caída de la curva de resistencia aerodinámica se debe a la reducción de la velocidad del camión y viceversa. Tampoco en este caso el CAN bus nos proporciona el instante exacto en el cual el camión estacionó para hacer el peaje, por eso no se ve el valor de 0 en la curva de resistencia aerodinámica. Sabemos que ha parado en el peaje ya que las coordenadas de este están dentro del intervalo de coordenadas del CAN bus anterior y posterior al peaje.

En este caso tampoco se observa un incremento de la velocidad del viento, por lo que su influencia en este tramo y en lo que llevamos de recorrido es nula. Esta parada también es obligatoria y se reflejará en todas las curvas de resistencia de los 18 viajes analizados.

- Tramo 5:

En este tramo sombreado en amarillo de la gráfica 12 es la primera vez que se puede ver un repunte considerable del valor de la resistencia aerodinámica en el recorrido. Si nos fijamos en el aumento de la curva de la velocidad frontal del viento vemos que los dos repuntes se corresponden en ese instante, por lo que podemos asegurar la influencia en la resistencia aerodinámica del viento en carretera. Como se puede ver, la curva naranja correspondiente al viento frontal aumenta por primera vez en el recorrido. Mediante la flecha negra se ha querido señalar su relación y correspondencia con el aumento en la curva de la resistencia aerodinámica. Aunque el valor máximo que alcanza no es demasiado alto (2,08 m/s), se puede ver que es suficiente para provocar un pico en la curva de la resistencia.

La velocidad del camión también aumenta en este intervalo, pero como se denota en la gráfica 12, el valor tan alto que alcanza la curva azul corresponde al aumento de la velocidad del viento. Aunque los valores de las curvas azul y gris estén en diferentes magnitudes, se puede ver que la única vez en los 263,1 km que la resistencia aerodinámica está por encima de la velocidad del camión se corresponde con el aumento de la velocidad del viento. Por lo tanto, esta zona amarilla es clave para poder determinar gráficamente esa influencia que se buscaba.

- Tramo 6:

Esta parte del recorrido es parecida a la primera y a la tercera. Se caracteriza por la estabilidad de la curva de resistencia debido a la misma característica en la velocidad del camión. Es una zona por lo tanto sin tráfico, sin paradas en estaciones de servicio o peajes y con una conducción poco brusca.

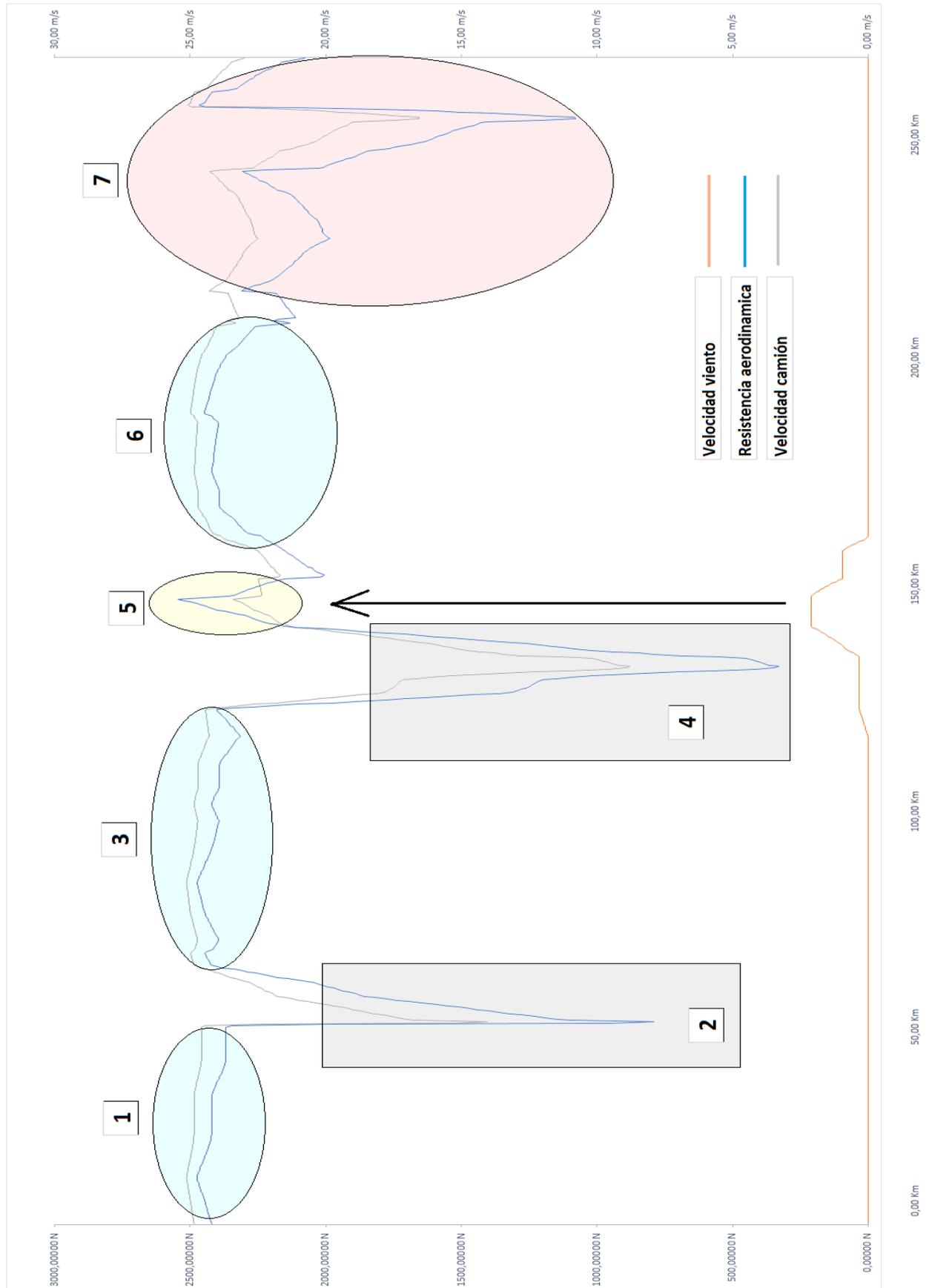
Se puede observar también que la velocidad del viento es nula en todo momento, por lo que las variaciones de resistencia aerodinámica se deberán a cambios en la velocidad del vehículo.

- Tramo 7:

Esta parte del viaje se caracteriza por una gran variabilidad en los valores de resistencia aerodinámica. Esto se puede deber a 3 factores: parada en estación de servicio o peaje, cambios en la velocidad frontal del viento que le afecta o tráfico denso. Descartamos la opción de parada en estación de servicio ya que el valor de la velocidad del camión no llega a ser nunca nula, como se ha explicado anteriormente este tipo de paradas dejan el registro de velocidad del camión en 0 m/s en el CAN bus. La opción de la parada en peaje también es inviable ya que en esa parte del recorrido no hay peajes. Otro de los factores que podrían producir estos cambios de valor se podría explicar mediante cambios en la velocidad del viento, pero como se puede ver, los valores de la curva naranja siguen siendo nulos en esta zona.

Por lo tanto, deducimos que esta característica cambiante de valores es causada por el tráfico denso. Esto se corresponde con la experiencia que se tiene sobre el tipo de circulación que se encuentra una vez se aproxima a Barcelona. Cualquiera que haya viajado por carretera alguna vez a Barcelona sabe que el tráfico se densifica conforme la distancia a la ciudad se reduce. Por lo tanto, nos hace pensar que esta suposición es cierta.

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO2



Gráfica 12. Velocidad del viento y camión superpuesta a la resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia aerodinámica. Curva gris: velocidad del camión. Curva naranja: velocidad del viento. Fuente: propia.

Se ha elegido analizar este primer viaje debido a la estabilidad de valores de velocidad del camión que nos proporciona el CAN bus en la mayor parte del recorrido. Debido a esta característica se puede apreciar con más claridad como afecta la velocidad del viento en carretera a la resistencia aerodinámica y por lo tanto al consumo y emisiones de CO₂. Como se ha explicado anteriormente, al ser la componente frontal de la velocidad del viento en todo momento igual a 0 la única variable que puede producir cambios en los valores de resistencia aerodinámica es la velocidad del camión.

Mas tarde se ha podido comprobar claramente que un repunte del valor de velocidad de viento provoca un pico en la curva de resistencia aerodinámica. Este primer viaje ha dado una velocidad media de viento de 0,156 m/s, un consumo de 46,76 l/100km, unas emisiones de CO₂ a la atmosfera de 323,18 kg y se ha caracterizado con un factor de tráfico o impedancia de 1,271. Mas tarde se analizará como influye esta velocidad del viento al consumo y las emisiones, individualmente y comparándola con el resto de los 17 viajes analizados.

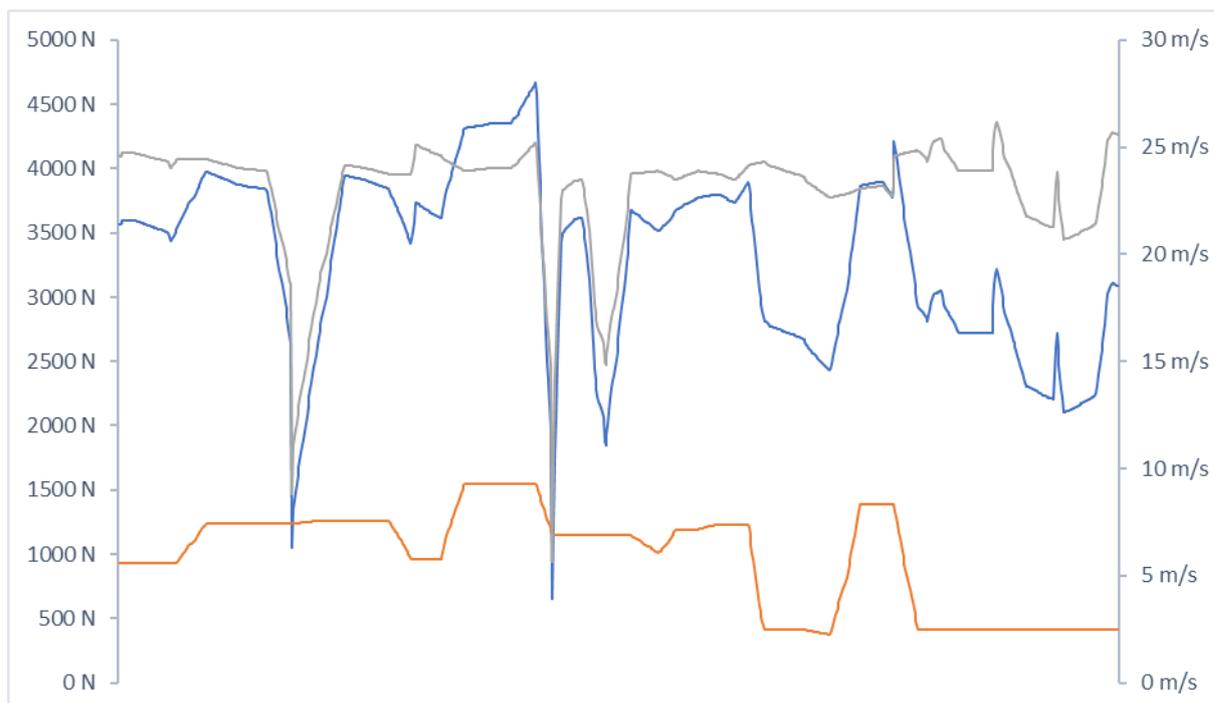
5.3 Análisis del efecto de la velocidad del viento en carretera en la resistencia aerodinámica en el viaje 3

Para seguir comprobando la influencia que el viento en carretera tiene sobre la resistencia aerodinámica se va a estudiar de la misma manera otro viaje, en concreto el número 3, que corresponde al día que más viento frontal le afectó al camión.

En este viaje se va a poder ver con más claridad esta influencia en la resistencia debido a la característica del viento del día. No solo es el día que más viento hizo, sino que también se alternan zonas del recorrido donde la velocidad era alta con otras zonas donde se producen bruscas caídas de velocidad del viento.

La gráfica 13 va a ser la de estudio. En ella se ha superpuesto a la curva de la resistencia aerodinámica (curva azul) la velocidad del camión (curva gris) y la velocidad del viento (curva naranja). Mas adelante en la página 56 se puede ver con más detalle cómo se ha dividido en las diferentes zonas.

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO₂



Gráfica 13. Resistencia aerodinámica, velocidad del viento y del camión a lo largo de la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 3). Curva azul: resistencia aerodinámica. Curva gris: velocidad del camión. Curva naranja: velocidad del viento. Fuente: propia.

Se vuelven a distinguir 7 tramos a lo largo de los 263,1 km de estudio.

- Tramo 1:

Este primer tramo, al igual que en el primer viaje, se caracteriza por la ausencia de tráfico y una velocidad del camión prácticamente constante resultado de una conducción sosegada (curva gris). La afirmación anteriormente hecha de que estos primeros 40 kilómetros tienen un tráfico fluido se corrobora en este tercer viaje. En esta primera parte se puede ver que el viento sí que le está afectando frontalmente, a una velocidad de 5,58 m/s. Se observa un repunte de la curva azul correspondiente a la resistencia aerodinámica cuando la velocidad del viento pasa de los 5,58 m/s iniciales a los 7,42 m/s. Es por lo tanto la primera zona donde se puede ver esa influencia buscada.

En esta primera parte, por lo tanto, no solo la velocidad de camión contribuye al valor de resistencia aerodinámica, si no que el viento también aporta. Esto será lo habitual a lo largo de la ruta como se podrá ver más adelante.

- Tramo 2:

Este tramo es igual en todos los viajes. Supone una parada obligatoria en el peaje de la AP-2 y por lo tanto va a ser común siempre. Los valores de resistencia aerodinámica vienen determinados fundamentalmente por el decrecimiento y el aumento de la velocidad del camión.

En este tramo la velocidad del viento sigue siendo constante a 7,42 m/s, pero como se ha explicado, no es determinante en las variaciones de valores en la curva de resistencia.

- Tramo 3:

Esta parte de la ruta vuelve a tener una velocidad del vehículo constante, debido al tráfico fluido. Sin embargo, se producen dos repentinas variaciones de resistencia aerodinámica debido a picos y valles en los valores de viento. Primero se observa que la velocidad del viento cae hasta los 5,58 m/s de inicio y luego esta aumenta de forma considerable hasta los 9,3 m/s, unos 33 km/h. Este valor es el mayor que se registra no solo en este viaje sino en cada uno de los 17 viajes restantes. Provoca también el mayor valor de resistencia aerodinámica en todos los viajes, un total de 4684 N. En la gráfica 14 se puede ver representado como un importante pico.

En este tramo, por lo tanto, se puede ver la influencia del viento, no solo cuando su valor cae sino también cuando se produce una fuerte racha. Se ha querido señalar con flechas negras en la gráfica 14 ascendentes esta correspondencia entre valores.

- Tramo 4:

Esta zona está totalmente influenciada por una parada en un área de servicio correspondiente a las coordenadas (41.4963760277778 0.3969783333333333) que nos proporciona el CAN bus. La curva de resistencia aerodinámica como pasaba en el tramo 2 vuelve a estar influenciada por la bajada y subida de la velocidad del camión. En este tramo la velocidad del viento sigue siendo constante, pero como se ha dicho, no es determinante en las variaciones de valores de la curva de resistencia aerodinámica. Esta es una parada que no se suele producir en los sucesivos viajes y al contrario con lo que sucede con las paradas en peajes, es voluntaria y por lo tanto característica de este viaje en particular.

- Tramo 5:

De nuevo el camión realiza la parada obligatoria en el peaje de incorporación a la A2. Lo mismo que se ha comentado en el tramo 4 y 2 sirve para este. La velocidad del viento sigue siendo constante pero lo que determina la caída de valores de resistencia aerodinámica es la velocidad del camión.

- Tramo 6:

Este tramo es muy parecido al tercero. La velocidad del camión es prácticamente constante, pero se observan grandes variaciones de la curva azul correspondiente a la resistencia aerodinámica. En la primera parte de esta zona se pueden observar valores constantes de la resistencia aerodinámica, esto se debe a dos factores.

En primer lugar, la velocidad del camión es constante ya que está circulando sin tráfico denso y en segundo lugar la velocidad del viento también es constante e igual a 7,40 m/s. Esto no produce variaciones bruscas en la resistencia. Sin embargo, una vez pasada esta zona la velocidad del viento decrece a 2,50 m/s y afecta de la misma manera a la curva azul, se puede observar una fuerte caída de la resistencia. Mas adelante, el viento vuelve a aumentar a los 8,36 m/s (30 km/h) que corresponde con una subida de la curva azul a valores aproximados de 4000 N.

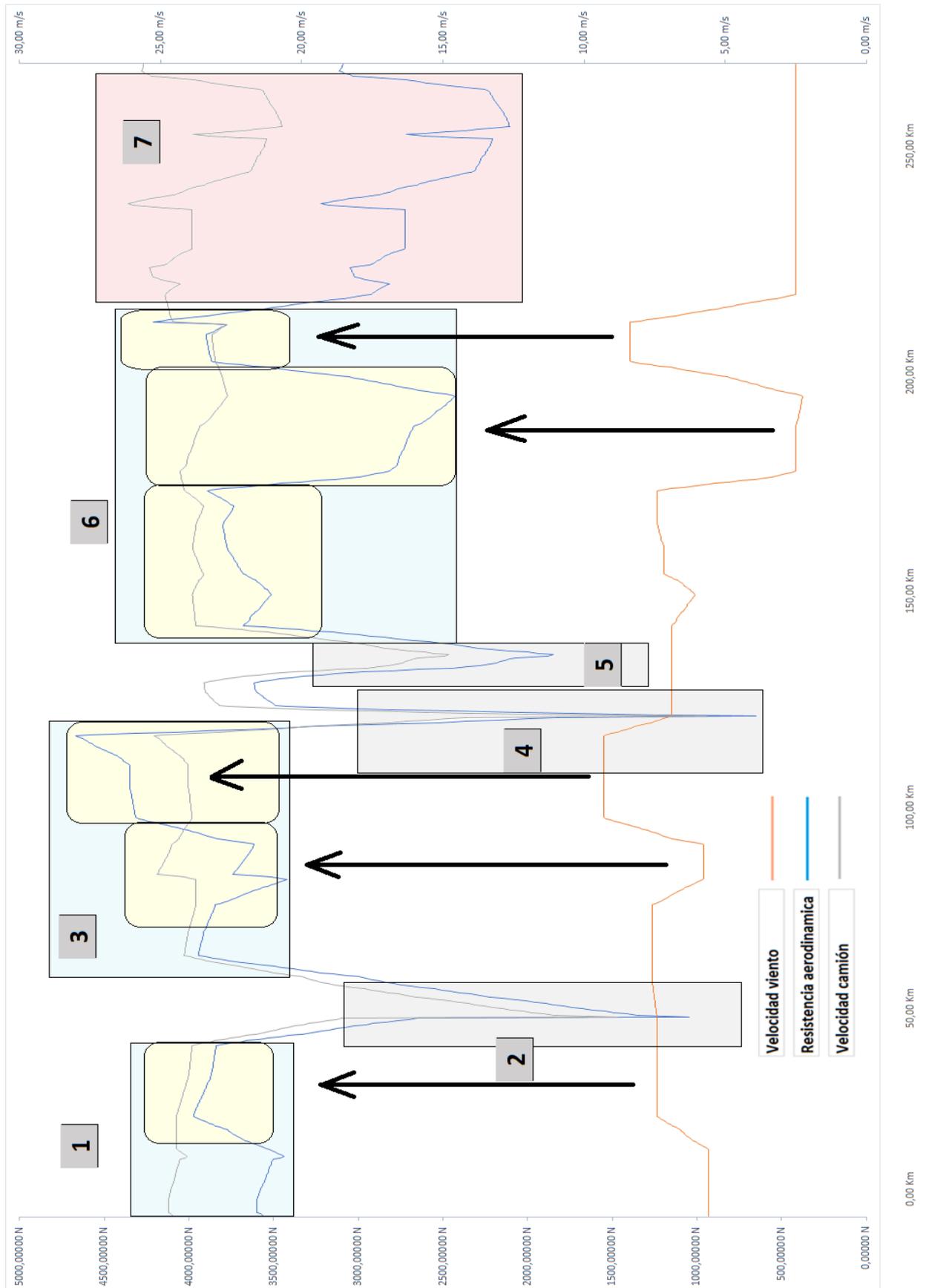
Este tramo por lo tanto es apto para analizar la influencia del viento, ya que en ella el camión se encuentra tanto con una velocidad constante del viento, como con bajadas y aumentos bruscos. Por lo tanto, este tramo está influenciado por el viento en todo momento.

- Tramo 7:

Esta parte del recorrido vuelve a estar determinada principalmente por el tráfico denso. En estos últimos kilómetros no existen peajes y aunque hay áreas de servicio se ha podido comprobar que no ha parado debido al estudio de las coordenadas del CAN bus y la metodología antes expuesta. Esto no hace más que corroborar lo que antes se ha afirmado del estado del tráfico una vez se reduce la distancia a Barcelona. Cuando el camión se aproxima a la ciudad, el tráfico se densifica considerablemente y los datos de velocidad del camión que el CAN bus proporciona son muy variables.

En esta parte final de la ruta la velocidad del viento se puede comprobar que es constante y por lo tanto las variaciones de resistencia aerodinámica se deben a la variabilidad de velocidad del vehículo consecuencia del tráfico.

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO2



Gráfica 14. Velocidad del viento y camión superpuesta a la resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 3). Resistencia aerodinámica. Curva gris: velocidad del camión. Curva naranja: velocidad del viento. Fuente: propia.

Las zonas azules son las que se caracterizan por valores constantes de velocidad del vehículo y por lo tanto ausencia de tráfico, donde los instantes de influencia de viento se han remarcado en amarillo. Las partes sombreadas de rojo son características de tráfico denso donde sería muy difícil ver la influencia de la velocidad del viento en la resistencia aerodinámica. Los tramos grises son por lo tanto paradas en áreas de servicio o peajes donde el viento no tiene prácticamente correspondencia con la variabilidad de valores de resistencia.

Este viaje es el que mayor consumo de combustible ha dado al final de los 263,1 km, un total de 50,48 l/100km, unas emisiones de CO₂ a la atmósfera de 348,87 kg y se ha caracterizado con un valor de impedancia o tráfico de 1,818. La velocidad media de viento que le ha estado afectando a lo largo del recorrido ha sido de 5,839 m/s (21 km/h).

Se ha elegido este viaje para analizarlo no solo por los valores altos de viento en carretera, sino también por los cambios bruscos de valores que se observan. El tramo 6 es un claro ejemplo donde se combinan los 3 comportamientos que puede tener el viento: constante, aumento brusco y decreciente.

Por lo tanto, podemos empezar a comprobar a grandes rasgos que el comportamiento del viento en ruta afecta al consumo. Se ha producido un aumento de 3,72 l/100 km respecto al primer viaje analizado con un incremento de la velocidad media del viento de 0,156 m/s a 5,839 m/s. Un total de 9,78 litros de combustible al final del recorrido. Estando el precio medio del Diesel a 1,2 €/l ese incremento en la velocidad del viento supone aumentar el gasto en combustible 11,73 € por viaje, porcentualmente un aumento del gasto del 8%. Aunque este valor no es demasiado alto recordemos que el flujo de viajes en empresas de transporte es considerablemente alto y al final de año puede suponer un alto sobre coste. La influencia en el consumo de la velocidad del viento se analizará posteriormente con más detalle.

5.4 Análisis de las diferencias de valores de resistencia aerodinámica entre el viaje 1 y 3

Una vez que se ha comprobado y analizado la influencia del viento en los dos viajes por separado, el siguiente paso es ver realmente la diferencia de valores de resistencia aerodinámica que produce el efecto del viento un día con altos valores de viento y otro día con valores nulos. Para eso se han estudiado los dos viajes en conjunto.

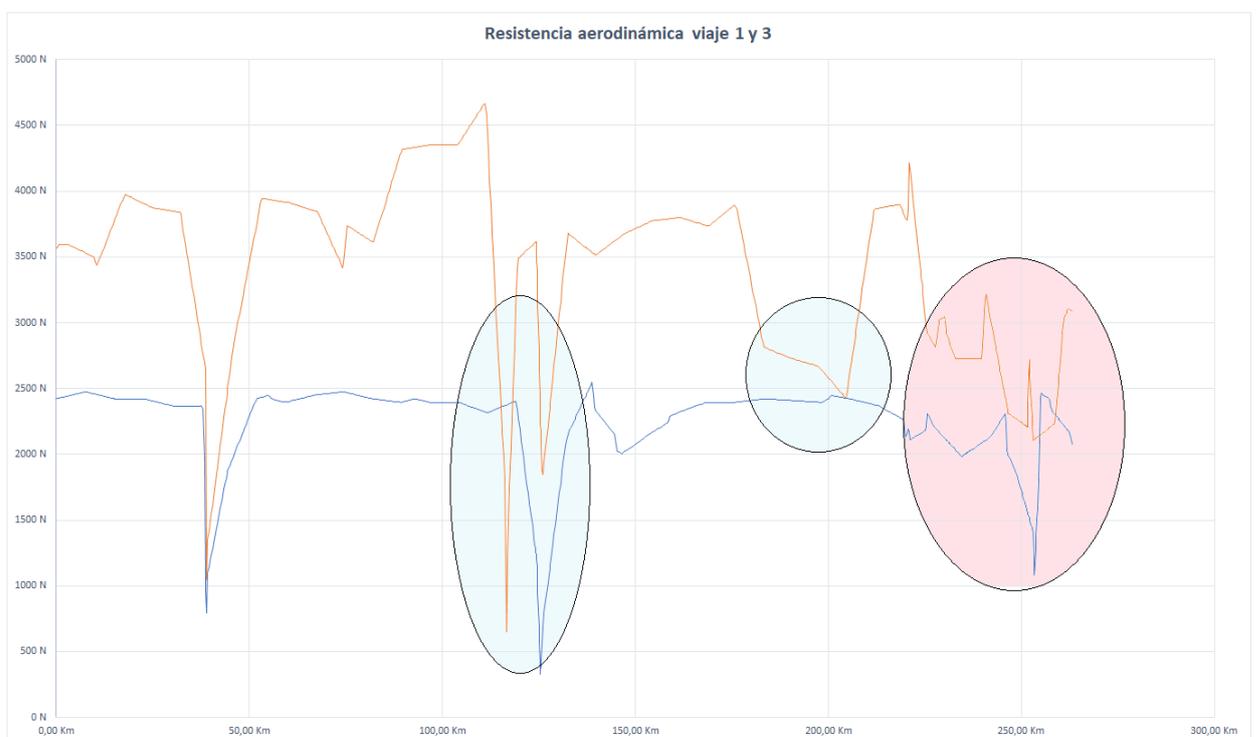
En la gráfica 15 se puede ver la gran diferencia de valores de resistencia aerodinámica que el viento produce a lo largo de la ruta. La curva naranja pertenece al viaje 3 y la azul al viaje 1. En todo momento los valores de la resistencia aerodinámica son mayores en el viaje 3 que en el 1. Recordemos que la velocidad media del viento en los viajes ha sido de 5,839 m/s y 0,156 m/s respectivamente. Únicamente cuando el camión del viaje 3 para en la estación

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO2

de servicio (zona sombreada de color azul cercana al kilómetro 40) la curva de resistencia del viaje 3 da valores inferiores a la del viaje 1.

La otra zona donde las curvas se llegan a igualar (zona sombreada de color azul cercana al kilómetro 200) es la que corresponde a un decrecimiento brusco de la velocidad del viento en el viaje 3. Cabe recordar que pasa de un valor de 7,4 m/s a 2,5 m/s en ese instante.

En la última parte del trayecto (zona sombreada en rojo) las dos curvas se aproximan e incluso hay un instante en el que la resistencia del viaje 1 es mayor que la del 3. Esto se debe al tráfico. Como se ha explicado anteriormente, cuando el vehículo se aproxima a Barcelona el tráfico se densifica y las variaciones de valores de resistencia empiezan a estar más determinados por la velocidad del camión y sus continuos acelerones y frenazos que por la velocidad del viento. Por lo que ver la influencia del viento en este tipo de situación es realmente complicado.

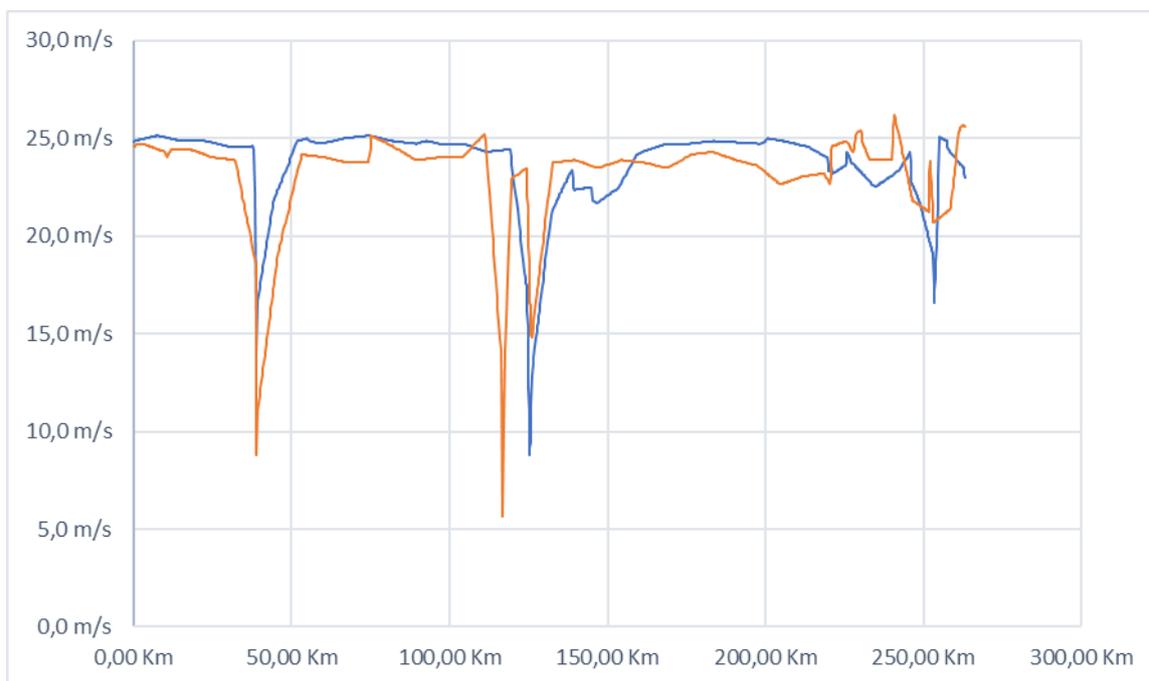


Gráfica 15. Resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell en el viaje 1 y 3. Curva azul: resistencia aerodinámica en el viaje 1. Curva naranja: resistencia aerodinámica en el viaje 3. Fuente: propia.

Podría pensarse que esta diferencia entre resistencias se debe a una mayor velocidad del camión en el viaje 3 que en el 1. Podría darse el caso en el cual la diferencia de velocidad del camión entre viajes fuera tan alta que neutralizara (o incluso provocara el efecto contrario) el efecto de una velocidad del viento inversamente proporcional. Parece improbable que esto pueda suceder, por lo menos en el caso que estamos estudiando. La expresión de la resistencia aerodinámica lo permite, pero rara vez va a haber una gran diferencia media entre las velocidades del vehículo.

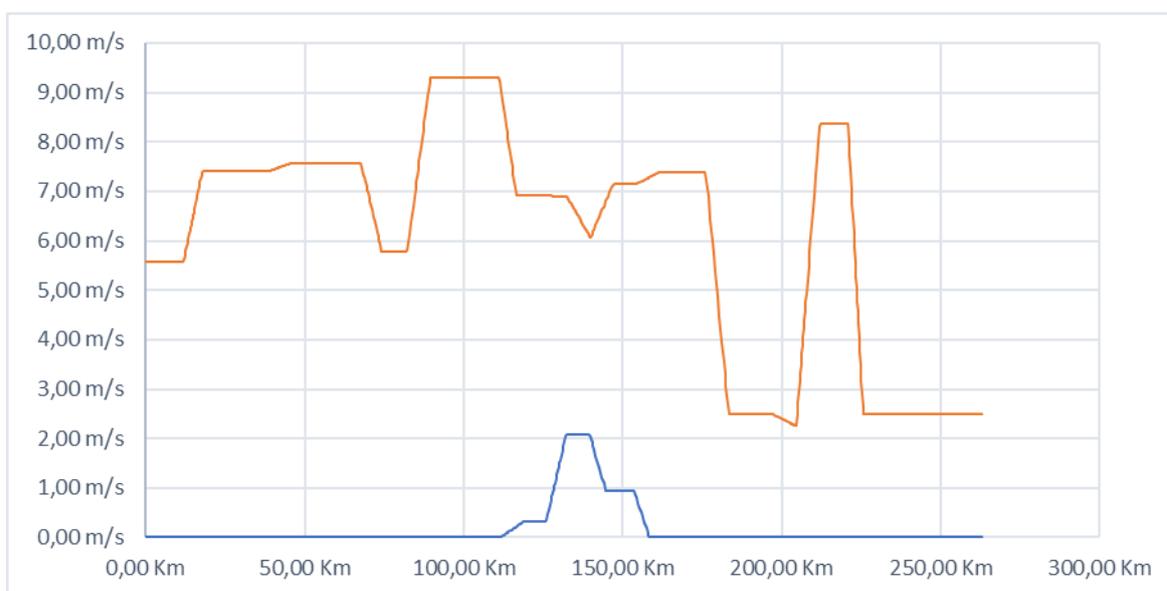
5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO2

En este caso en concreto se puede comprobar en la gráfica 16 que la velocidad del camión es prácticamente la misma en los 2 viajes y que, por lo tanto, esta diferencia de valores de resistencia no se debe a ella. La curva azul corresponde al viaje 1 y la naranja al viaje 3.



Gráfica 16. Velocidad del camión en la ruta Zaragoza-Martorell (viaje 1 y 3). Curva azul: velocidad del camión en el viaje 1. Curva naranja: velocidad del camión en el viaje 3. Fuente: propia.

La diferencia de valores de resistencia aerodinámica, una vez que se ha comprobado que no es por diferencia de velocidades del camión, se explica por lo tanto por variaciones en la velocidad frontal del viento. En la Gráfica 17 se puede ver esa diferencia de valores de viento a lo largo de toda la ruta. La curva azul corresponde la velocidad del viento en el viaje 1 y la naranja la del viaje 3.



Gráfica 17. Velocidad del viento en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1 y 3). Curva azul: velocidad del viento en el viaje 1. Curva naranja: velocidad del viento en el viaje 3. Fuente: propia.

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO₂

En la gráfica 18 se han definido todas las curvas anteriormente mencionadas (menos la de velocidad del vehículo) con la intención de ver con más claridad la influencia entre la diferencia de valores de velocidad de viento en la resistencia aerodinámica.



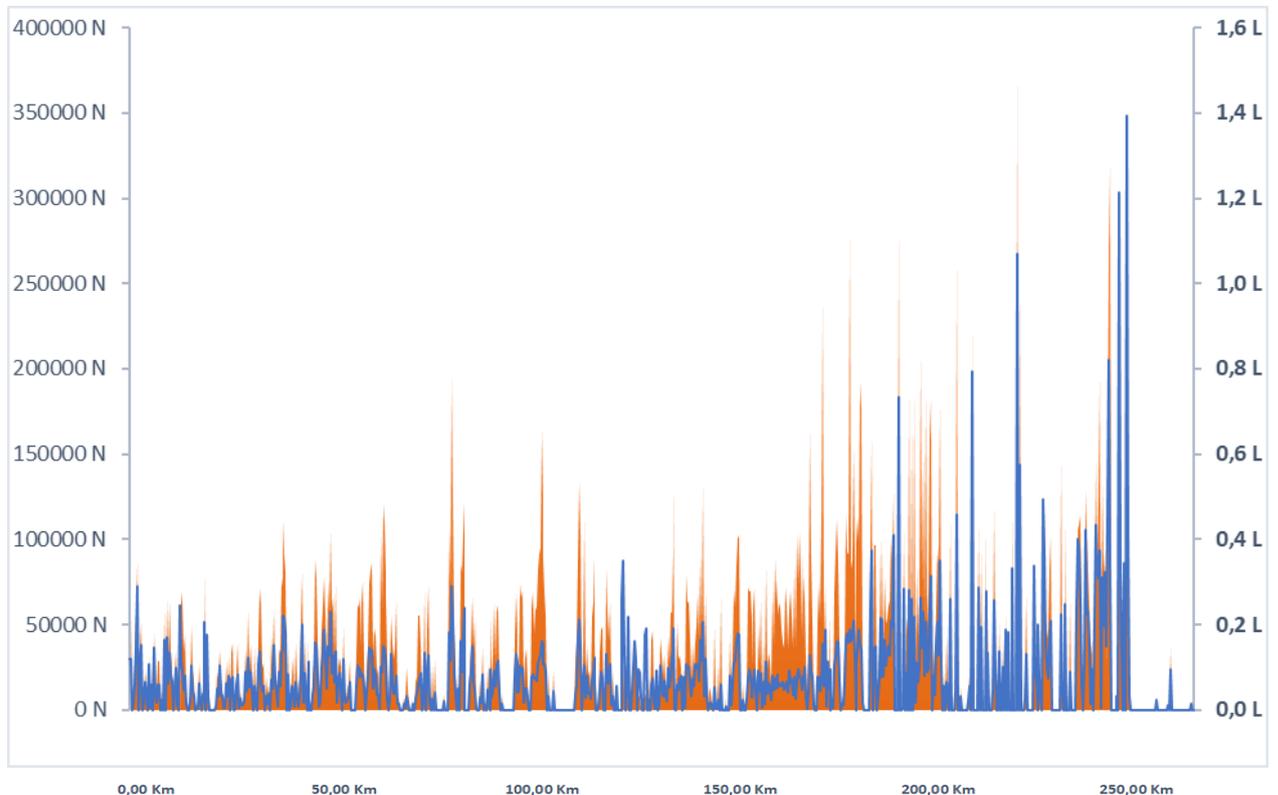
Gráfica 18. Velocidad del viento y resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1 y 3). Curva azul oscura: resistencia aerodinámica viaje 1. Curva azul clara: velocidad del viento en el viaje 1. Curva marrón oscura: resistencia aerodinámica del viaje 3. Curva marrón clara: velocidad del viento en el viaje 3. Fuente: propia.

La curva azul oscura es debida a la resistencia aerodinámica del primer viaje y la azul clara representa la velocidad del viento en el viaje 1. La marrón oscura muestra los valores de resistencia aerodinámica del viaje 3 y la marrón clara es debida a la velocidad del viento en el viaje número 3.

5.5 Análisis de la influencia de las resistencias al avance del vehículo en consumo de combustible y emisiones de CO₂ a la atmósfera

Una vez que ya se ha visto y comprobado la influencia que la velocidad del viento tiene en la resistencia aerodinámica en la ruta, queda por buscar su correspondencia con el consumo y emisiones de CO₂. Se va a volver a utilizar el viaje 1 y el 3 para comprobarlo. Los motivos para elegir de nuevo estos dos viajes son los mismos que los anteriores, un viaje con una velocidad del viento prácticamente nula (viaje 1) y otro viaje con las características opuestas (viaje 3).

Veamos en primer lugar el consumo total a lo largo de la ruta en el viaje 1 comparado con la resistencia total que el camión ha debido vencer. Como se ha comentado, los cálculos han tenido en cuenta el rendimiento del motor de 550 CV del camión de estudio, un 65%. Los resultados se pueden ver en la gráfica 19.



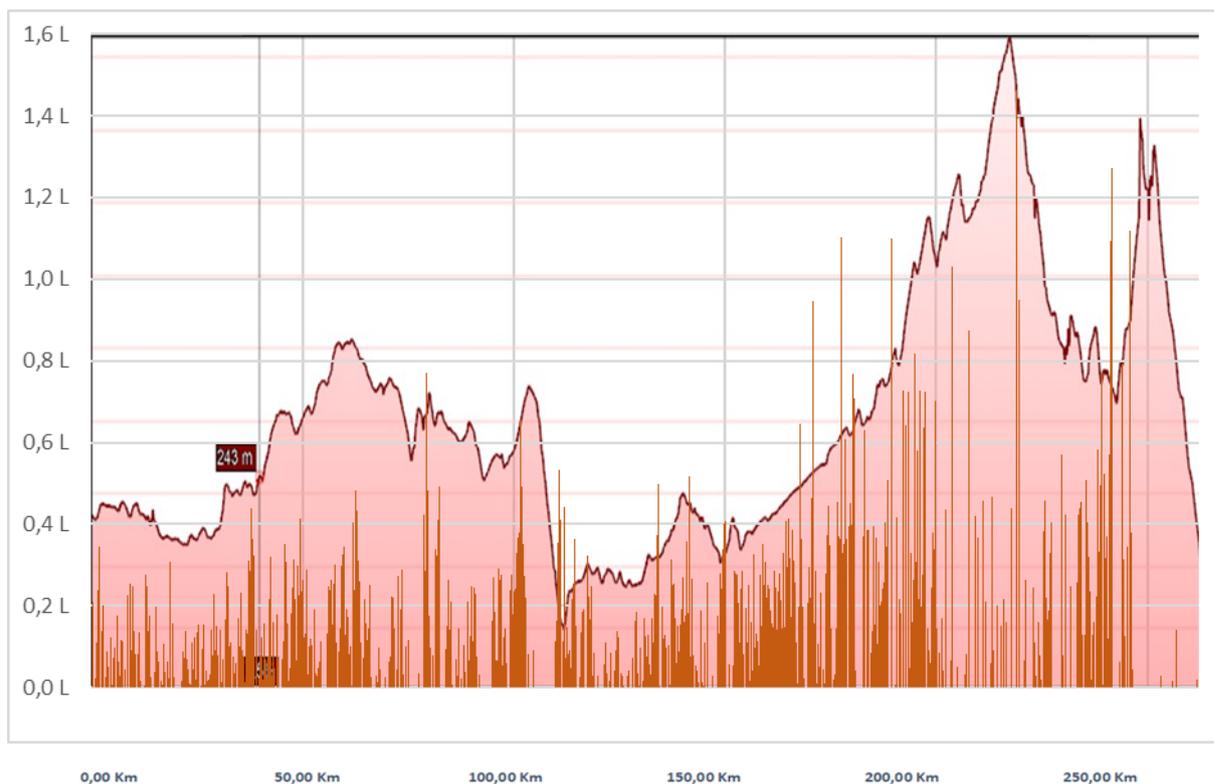
Gráfica 19. Consumo y resistencia total vencida por el motor en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia total vencida por el motor. Columnas naranjas: consumo de Diesel. Fuente: propia.

La curva azul es debida a la resistencia total vencida por el motor, mientras que las columnas naranjas indican el consumo de Diesel en litros por tramo. En esta gráfica no se puede apreciar con claridad ninguna de las correspondencias entre datos que se buscaba, la gran cantidad de datos y sus variaciones producen que sea imposible sacar ninguna conclusión.

Recordemos además que la ruta se ha dividido en tramos que no son de la misma longitud, por lo que los valores de consumo de Diesel en esta gráfica 19 estarán no solo determinados por la resistencia, sino también por la longitud del tramo. Una primera suposición nos haría pensar que los picos de consumo que se ven en la gráfica corresponden a grandes pendientes.

Para ver esta relación se han dispuesto en la gráfica 20 los datos de consumo de combustible con el perfil de altura de la ruta de fondo.

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO2



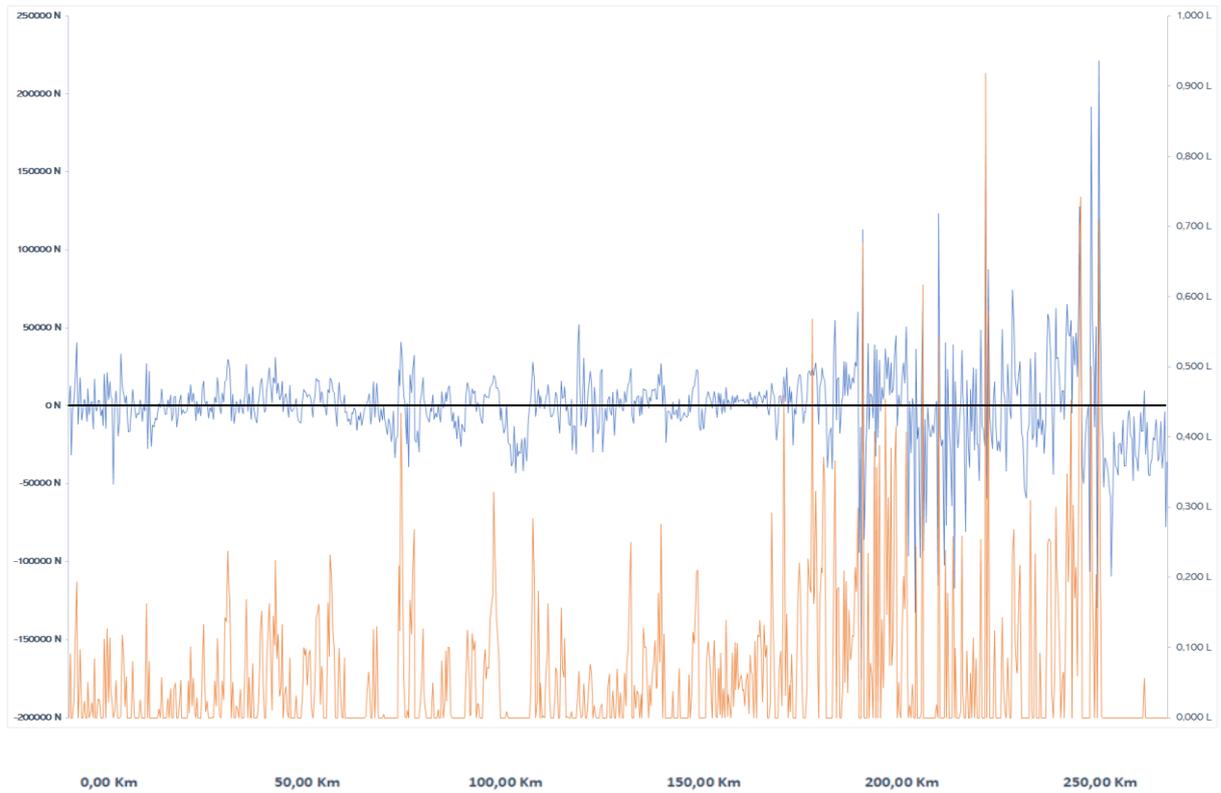
Gráfica 20. Consumo de Diesel frente a perfil de altura en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Columnas naranjas: consumo de Diesel. Zona sombreada rosa: perfil de altura de la ruta. Fuente: propia.

Se puede ver con más claridad en esta gráfica 20 la influencia que tienen las pendientes del recorrido en el consumo. La sucesión de pendientes positivas que empieza en el kilómetro 160, coincide con los mayores picos de consumo que se ven en la gráfica, valores de en torno a 1 litro.

Se puede comprobar también que los tramos que no han dado consumo de Diesel corresponden con pendientes negativas. Esto es debido a que en este tipo de tramos el conductor suelta el pie del acelerador y deja que el vehículo por la inercia se desplace. Esto solo sucede cuando la resistencia de la pendiente negativa es mayor que la suma del resto de resistencias positivas que impiden el avance del vehículo. En la última parte del recorrido se puede ver esta situación, la gran pendiente descendente al llegar a destino no provoca casi valores de consumo de combustible.

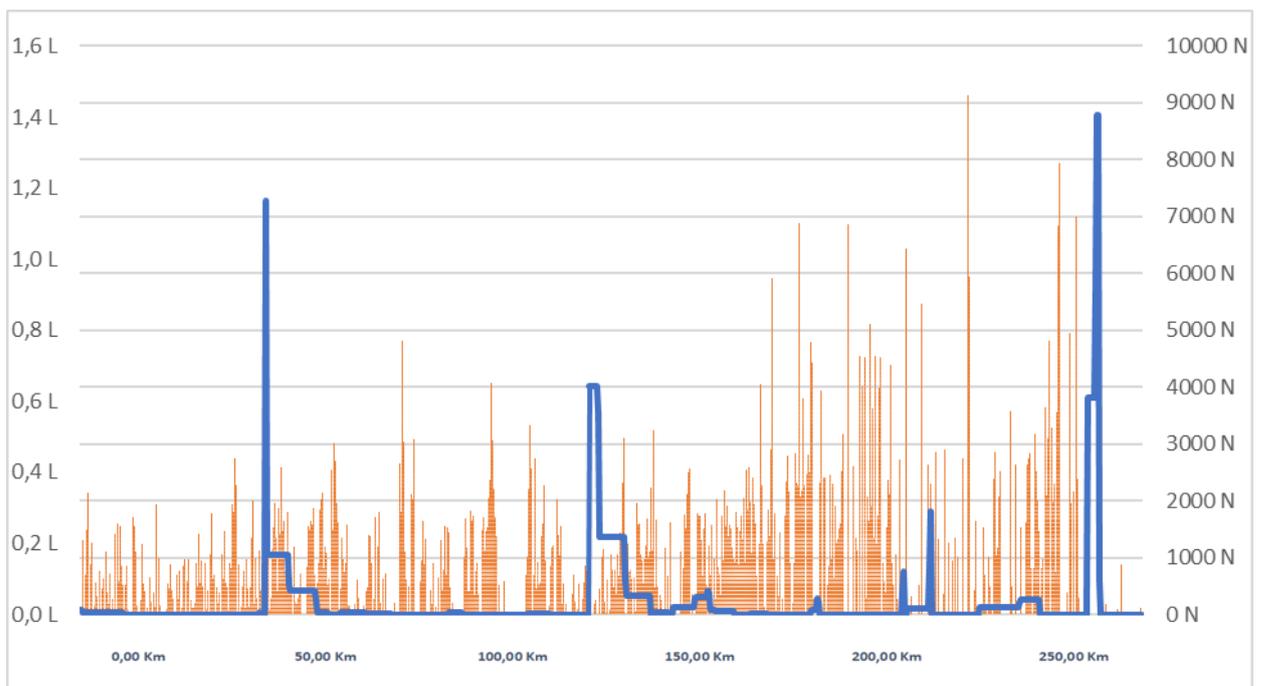
Esto último explicado se puede ver con más claridad en la gráfica 21. Se ha querido representar el consumo debido únicamente a la resistencia a la pendiente. La curva azul representa la resistencia a la pendiente, mientras que la naranja el consumo a lo largo del viaje 1 debido a las pendientes.

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO2



Gráfica 21. Resistencia a la pendiente frente a consumo debido a ella en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia a la pendiente. Curva naranja: consumo debido a las pendientes. Fuente: propia.

Otro factor que se considera para explicar la gráfica del consumo es la resistencia a la inercia. En la gráfica 22 se ha querido comprobar su influencia. La curva azul es debida a la resistencia por inercia, mientras que las columnas naranjas representan el consumo en cada tramo del viaje.



Gráfica 22. Consumo y resistencia a la inercia en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia por inercia. Columnas naranjas: consumo de Diesel. Fuente: propia.

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO2

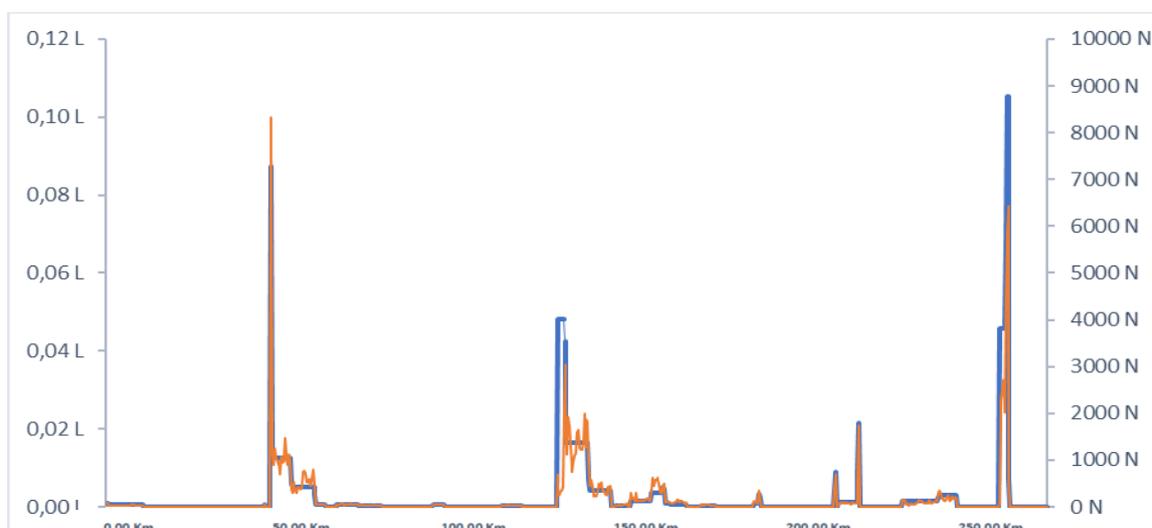
Puede parecer extraño que los 3 valores tan altos de resistencia a la inercia no provoquen un aumento considerable en el consumo. Se ha querido analizar con más detalle esos instantes con los cálculos numéricos.

Tabla 7. Cálculos de consumo a partir de la resistencia total. Fuente: propia.

KM	PENDIENTE	RESIST. PENDIENTE	RESIST. AERO	RESIST. RODADURA	ACELERACION	RESIST.INERCIA	DIESEL
38,95 Km	0,6026 %	4364,94 N	791,62199 N	3402,04 N	0,0000 m/s ²	0,0 N	0,1122 L
39,27 Km	1,8788 %	13613,01 N	1100,94791 N	3482,68 N	0,1753 m/s ²	7274,6 N	0,3499 L
39,58 Km	2,4609 %	17835,82 N	1147,28174 N	3493,39 N	0,0253 m/s ²	1048,0 N	0,3068 L
39,89 Km	0,8372 %	6064,45 N	1194,78005 N	3504,67 N	0,0253 m/s ²	1048,0 N	0,1579 L

Como se puede ver en los cálculos (tabla 7), un momento de aceleración tan alto como 0,1753 m/s² provoca un gran aumento de la resistencia a la inercia, da el segundo valor máximo en el viaje de hecho (7274 N). Pero aun siendo este valor tan alto, su contribución a la resistencia total y por lo tanto al consumo no es tan grande como hacía pensar, un 20 %. Si nos fijamos en el siguiente registro (39,58 km) el consumo es parecido al anterior (0,3 litros). Esto es debido a un aumento de la pendiente y por lo tanto su resistencia. Un aumento de la pendiente de solo el 0,58 % (2,46 % - 1,8788 %) respecto al anterior registro es capaz de “camuflar” el efecto de mayor aceleración en el viaje. Esto sucede de la misma manera en los otros tres picos de resistencia de inercia que se observan.

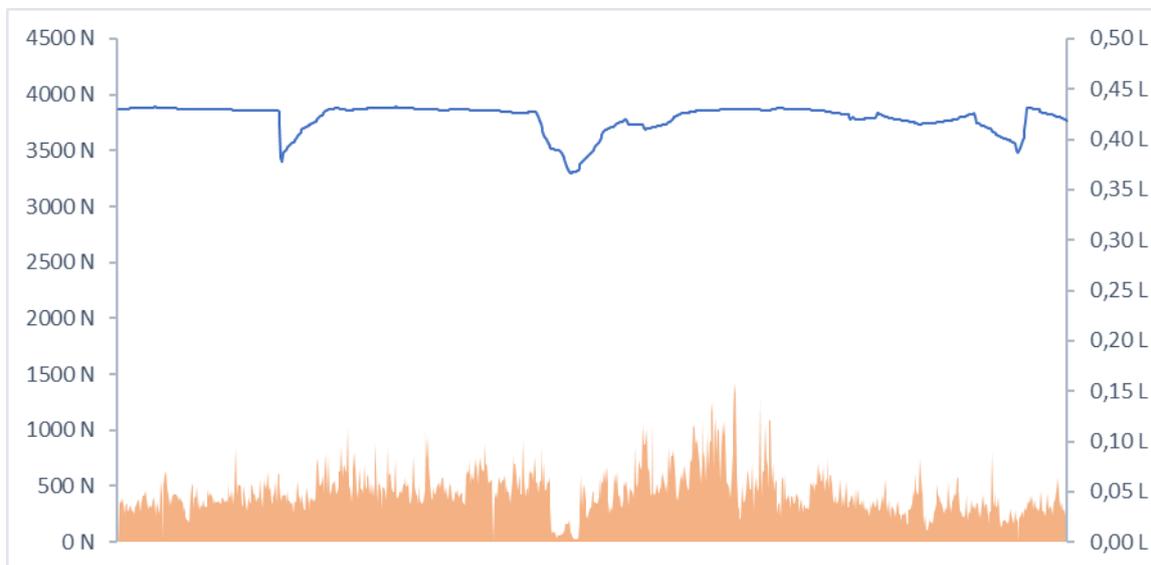
Esto confirma que la resistencia a la inercia no supondrá un efecto tan determinante en el consumo como cabía esperar. Al ser el trayecto por carretera y producirse tan pocos acelerones y frenadas su contribución será casi despreciable. Se ha querido aislar gráficamente el consumo que produce esa resistencia a la inercia en la gráfica 23. Por lo tanto, en esta gráfica se puede comprobar que, aunque su contribución al consumo total no es muy influyente, los picos de resistencia a la inercia son proporcionales al aumento de su contribución de consumo de combustible al total. La curva naranja corresponde al consumo de Diesel mientras que la curva azul representa la resistencia a la inercia.



Gráfica 23. Consumo y resistencia a la inercia en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva naranja: consumo de Diesel. Curva azul: resistencia a la inercia. Fuente: propia.

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO₂

La resistencia a la rodadura será otro aspecto a tener en cuenta en el consumo de combustible. Como se ha visto anteriormente, los valores de esta resistencia son prácticamente constantes y por lo tanto su contribución al consumo será homogénea a lo largo del recorrido.



Gráfica 24. Resistencia a la rodadura y su consumo debido a ella en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia a la rodadura. Columnas naranjas: consumo de combustible debido a la rodadura. Fuente: propia.

Como se puede ver en la gráfica 24, el consumo correspondiente a la rodadura es prácticamente constante debido a la misma característica en los valores de resistencia. No se observan picos de gran altura y los valores de consumo de Diesel están siempre acotados en intervalos entre 0 y 0,15 litros. La diferencia entre los valores de consumo de combustible que se pueden ver en la gráfica 24 van a estar determinados fundamentalmente por la longitud del tramo y no por la esta resistencia. La curva azul representa la resistencia debida a la rodadura, mientras que las columnas naranjas representan el consumo debido a ella. No se ha sobrepuesto esta curva de consumo debido a rodadura en la gráfica de consumo de Diesel total ya que no se observaría ningún tipo de correspondencia entre valores, los picos y valles del consumo total de combustible se deben mayoritariamente a la resistencia a la pendiente como se ha comprobado anteriormente.

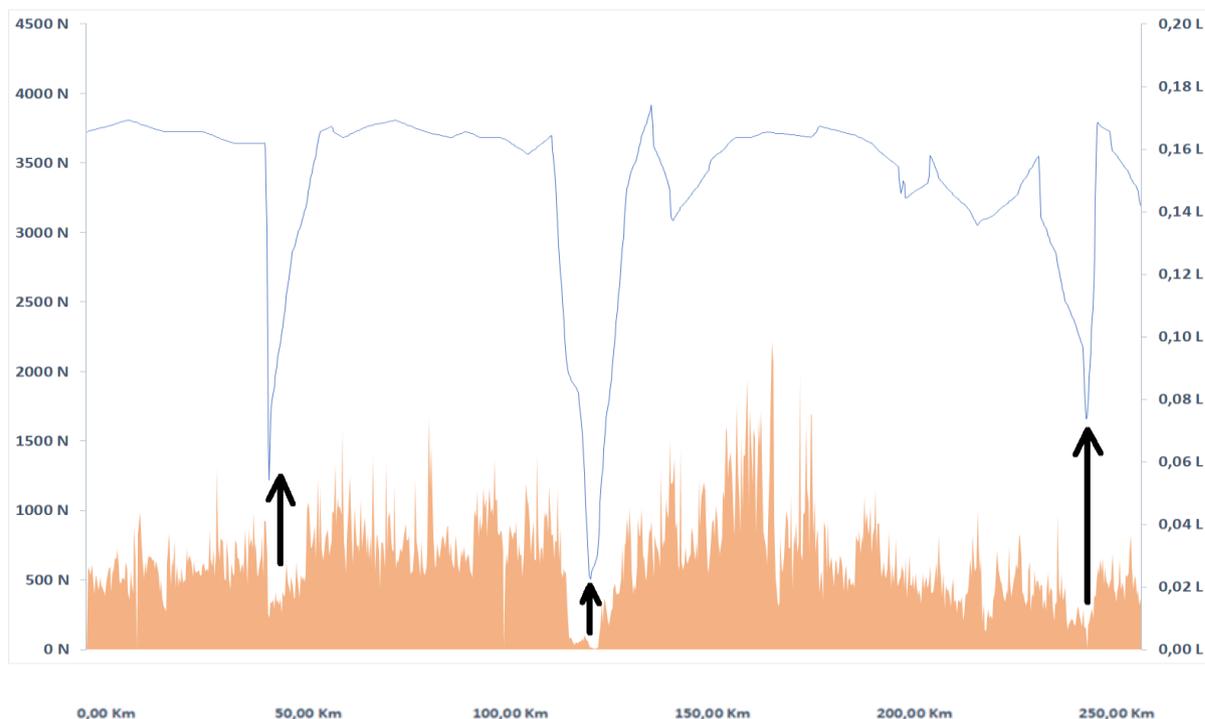
5.6 Análisis de la influencia de la resistencia aerodinámica y velocidad del viento en carretera en el consumo de Diesel en el viaje 1

Por último, nos queda comprobar la influencia de la resistencia aerodinámica en el consumo. En la gráfica 25 se puede ver esta resistencia aerodinámica (curva azul) y el consumo de Diesel por tramo debido a ella (área naranja). A simple vista no se ve que haya una relación de valores, únicamente cuando estos son muy extremos se puede empezar a ver su influencia. Esto es debido a la división en tramos que se ha hecho de la ruta. Se ha dividido en 867 tramos, como se ha explicado anteriormente, pero estos tramos no son de la misma longitud. Por lo que, un pico en la resistencia aerodinámica puede no reflejar un valor alto de

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO₂

columna naranja (consumo) si la distancia de ese tramo no es suficientemente alta. Recordemos que el consumo se ha calculado a partir de la energía suministrada por el motor, y esta a su vez multiplicando la distancia del tramo por el valor de la resistencia aerodinámica puntual.

La diferencia de valor de longitud entre distintos tramos no suele ser demasiado grande, pero si los valores de resistencia son parecidos, el consumo en ese tramo quedará fundamentalmente determinado por la longitud de este que por el valor de resistencia. Debido a esto, solo en situaciones donde los valores son muy extremos se podrá ver su correspondencia.



Gráfica 25. Resistencia aerodinámica y consumo en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia aerodinámica. Columnas naranjas: consumo de Diesel debido a la resistencia aerodinámica. Fuente: propia.

En la gráfica 25 se han querido señalar mediante flechas negras los valores extremos de resistencia aerodinámica que provocan caídas en el consumo de combustible. Sin embargo, no se puede determinar visualmente la influencia del viento en carretera con el consumo. Se ha decidido por lo tanto considerar una división de la ruta en tramos iguales y de 300 metros.

Con esta acción se pretende que la curva de consumo este más determinada por los valores de resistencia aerodinámica que por la distancia de tramo. Evidentemente un tramo corto con una resistencia aerodinámica alta nos dará un valor de consumo en ese tramo muy bajo. Por lo que esta división igualitaria de la ruta eliminará este efecto que de algún modo falsea la gráfica. En la gráfica 26 se pueden ver los resultados tras esta división de la ruta.

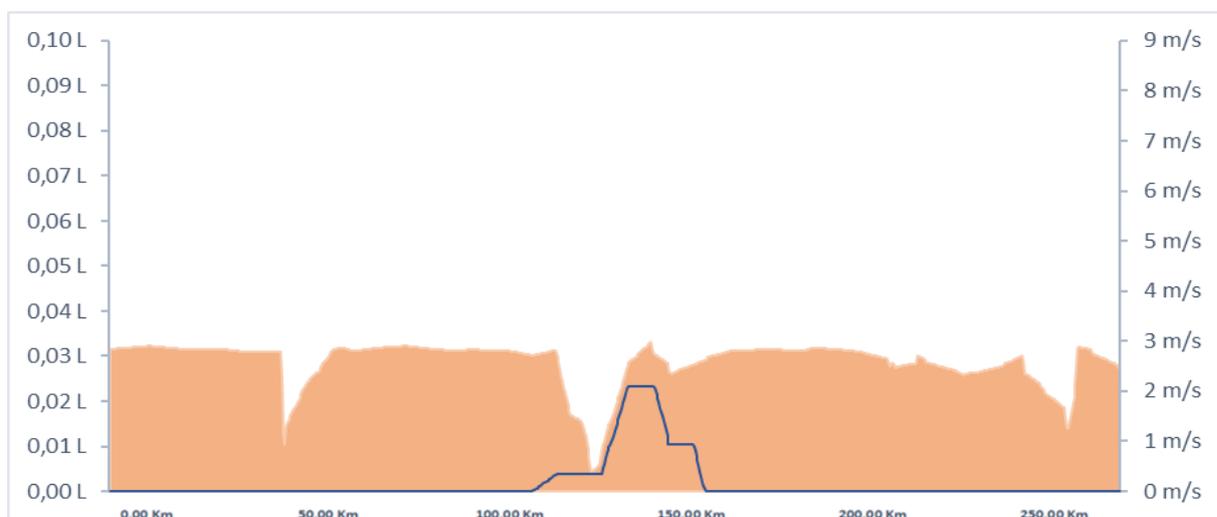
5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO₂



Gráfica 26. Resistencia aerodinámica y consumo en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: resistencia aerodinámica. Columnas naranjas: consumo debido a la resistencia aerodinámica. Fuente: propia.

Se puede comprobar que, haciendo una división de tramos igualitaria de la ruta, las áreas de consumo están en concordancia con los valores de resistencia aerodinámica. El siguiente paso será ver la influencia de la velocidad del viento en el consumo de Diesel. Haciendo la misma hipótesis, se ha querido poner en la misma gráfica la velocidad del viento y el consumo de combustible debido a la resistencia aerodinámica, los resultados se pueden ver en la gráfica 27.

El pico de velocidad máxima de viento (curva azul) corresponde por lo tanto con el valor más alto de consumo a lo largo de la ruta (columnas naranjas). Se ha podido, por lo tanto, gráficamente determinar esa influencia entre el viento y el consumo buscada.

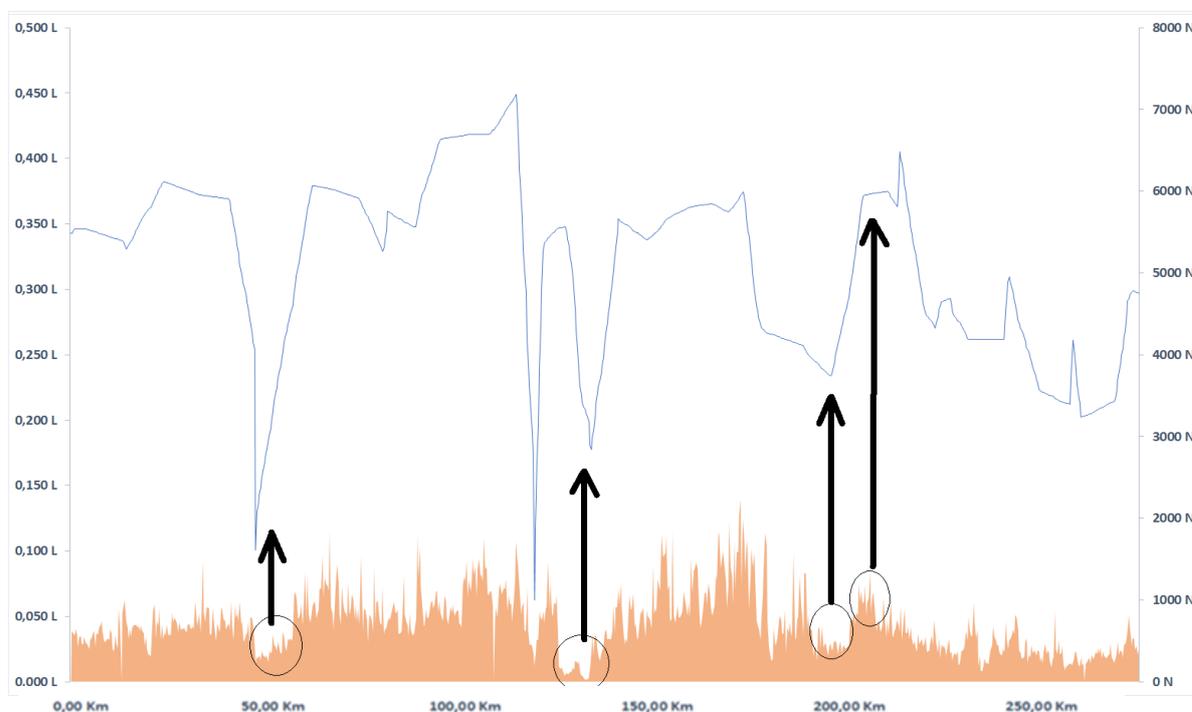


Gráfica 27. Consumo de Diesel debido a la resistencia aerodinámica frente a velocidad del viento en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1). Curva azul: velocidad del viento. Columnas naranjas: consumo debido a la resistencia aerodinámica. Fuente: propia.

5.7 Análisis de la influencia de la resistencia aerodinámica y velocidad del viento en carretera en el consumo de Diesel en el viaje 3

Se ha querido comprobar también la influencia en el consumo que tiene un día con un alto valor de velocidad media del viento. Se ha elegido el viaje 3, que corresponde con el día de más viento en carretera.

En la gráfica 28 se han trazado en la misma gráfica el consumo de Diesel debido a la resistencia aerodinámica (columnas naranjas) con la resistencia aerodinámica en el viaje (curva azul). A simple vista se puede observar cierta relación entre valores, pero como sucedía anteriormente, únicamente con los valores extremos de resistencia. Se ha querido marcar esta influencia con flechas negras. La división no igualitaria de la ruta es lo que no nos permite ver una clara relación, al igual que sucedía en el viaje número 1.

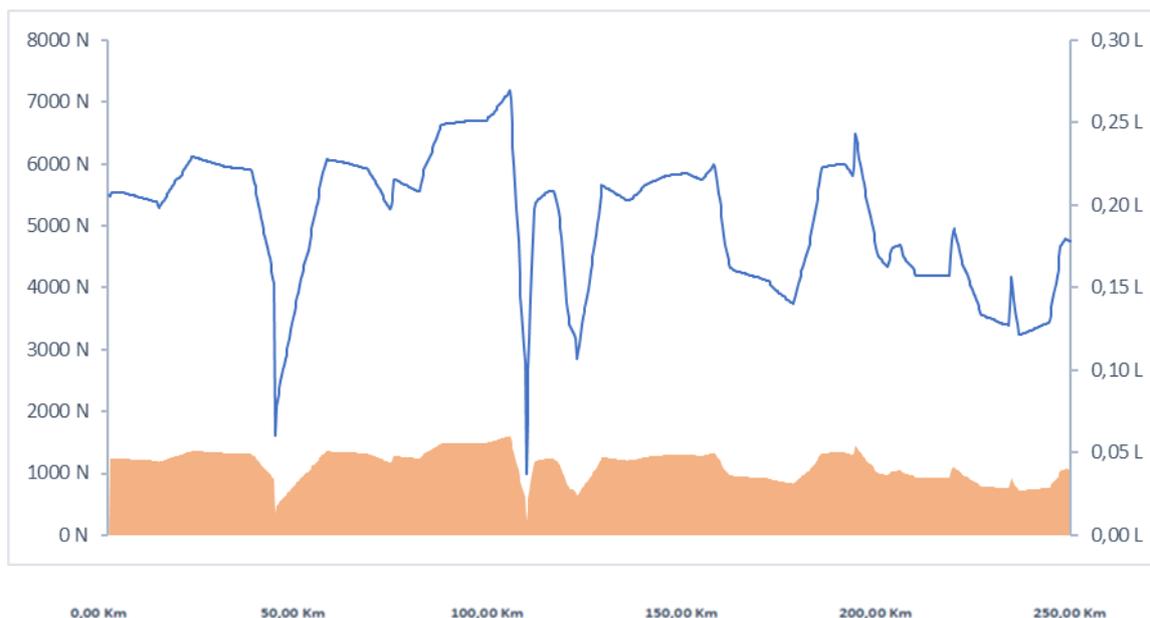


Gráfica 28. Consumo frente a resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 3). Curva azul: resistencia aerodinámica. Columnas naranjas: consumo debido a la resistencia aerodinámica. Fuente: propia.

Se ha procedido a dividir la ruta en tramos igualitarios de 300 metros. Con esto se pretende que las áreas de consumo de Diesel estén determinadas mayoritariamente por la resistencia aerodinámica en vez de por la longitud del tramo. El motivo es el anteriormente explicado. El resultado se puede ver en la gráfica 29.

Como se puede ver, la influencia de la curva de resistencia aerodinámica es clara en el consumo de Diesel a lo largo del viaje 3. Esta división igualitaria de la ruta provoca que se pueda observar la correspondencia entre picos y valles de valores.

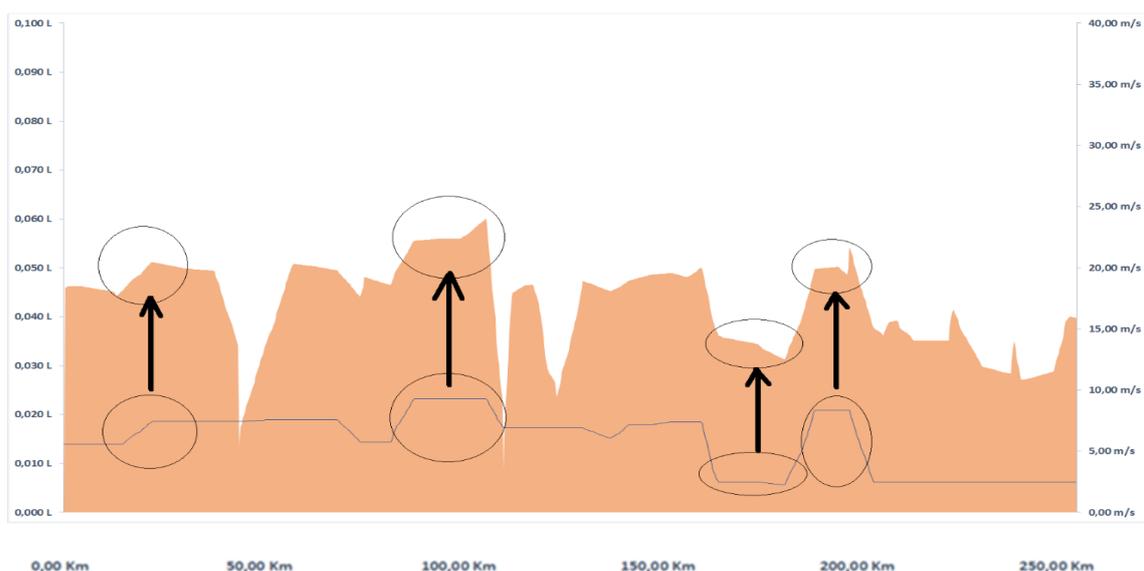
5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO2



Gráfica 29. Consumo de Diesel frente a resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 3). Curva azul: resistencia aerodinámica. Columnas naranjas: consumo debido a la resistencia aerodinámica. Fuente: Propia.

Por último, quedaría por comprobar gráficamente si existe influencia del viento en carretera en el consumo de Diesel. Recordemos que este viaje, número 3, es el que más velocidad media de viento ha registrado, por lo que podemos esperar que la relación se vea claramente. La gráfica 30 muestra los resultados.

En este viaje al ser mayor la velocidad media del viento y sus cambios bruscos, se puede ver con más claridad gráficamente su influencia. Se han detectado 4 zonas donde esta influencia es muy evidente. Las flechas negras resaltan esta correspondencia entre valores. Los picos de velocidad de viento provocan un aumento considerable del consumo, mientras que cuando este valor decrece, suele estar influenciado también por la misma característica en la velocidad del viento.



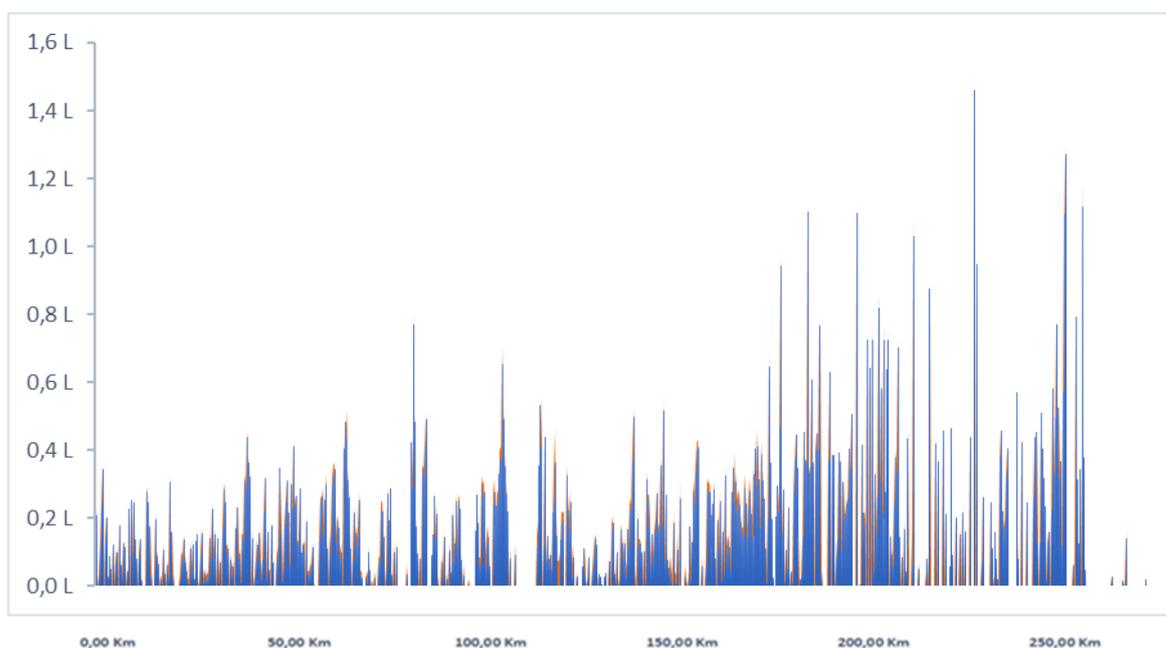
Gráfica 30. Consumo frente a resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 3). Curva azul: velocidad del viento. Columnas naranjas: consumo debido a la resistencia aerodinámica. Fuente: propia.

5. Análisis de la influencia del viento en carretera en la resistencia aerodinámica, consumo de Diesel y emisiones de CO₂

Al igual que en el viaje 1, se ha podido demostrar gráficamente esta influencia del viento en el consumo. Mas adelante se expondrán los resultados del resto de los 16 viajes y la relación entre ellos.

5.8 Análisis de las diferencias de consumo de Diesel entre el viaje 1 y 3

Por último, se ha querido comprobar la diferencia de consumo de combustible entre ambos viajes, uno con prácticamente nula velocidad del viento (viaje 1) y otro con alta velocidad media (viaje 3). Teniendo en cuenta los resultados anteriormente expuestos, cabe esperar que en una comparación gráfica se pueda ver estas diferencias de consumo en proporción al viento. La gráfica 31 muestra los resultados.



Gráfica 31. Consumo total en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1 y 3). Columnas azules: consumo de Diesel en el viaje 1. Columnas naranjas: consumo de Diesel en el viaje 3. Fuente: propia.

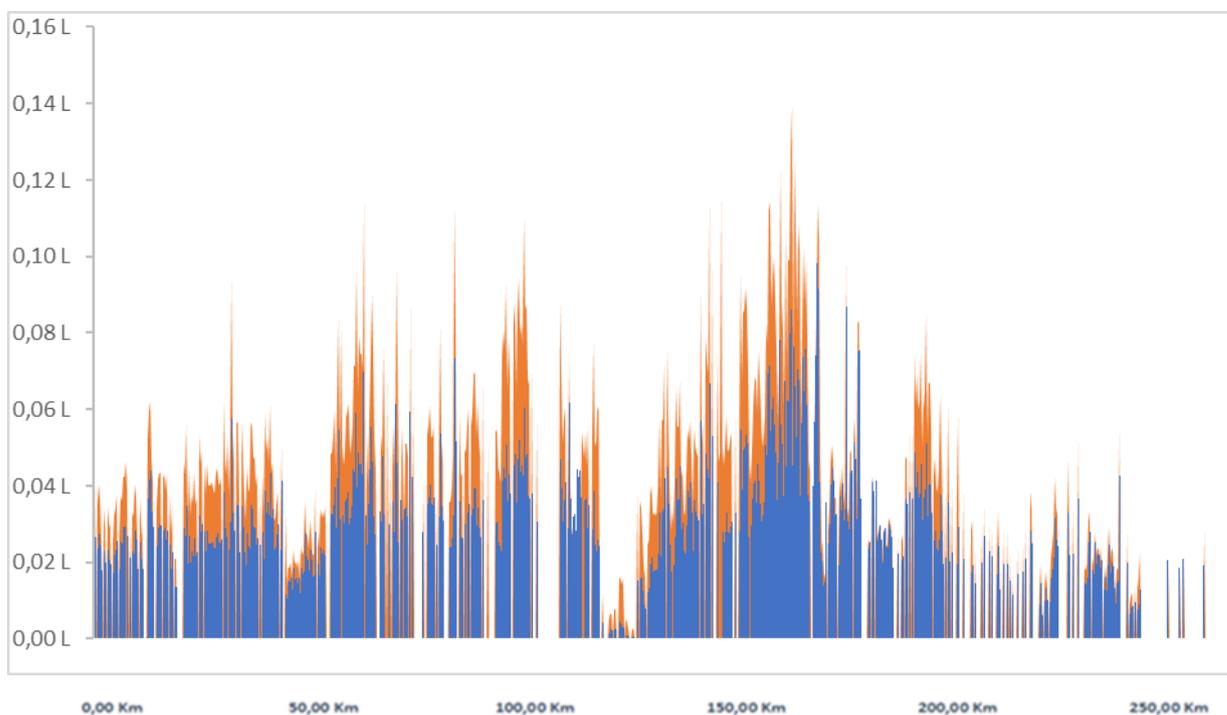
En esta gráfica sin embargo no se puede ver con total claridad esta diferencia de consumo entre viajes. Se puede ver que los valores de consumo del viaje 3 (columnas naranjas) alcanzan un valor más alto que los del consumo del viaje 1 (columnas azules). Sin embargo, debido a la cantidad de datos, esta diferencia no es tan evidente gráficamente.

Se ha decidido aislar por lo tanto los datos de consumo debido a la pendiente y a la rodadura, ya que se consideran prácticamente iguales. Los consumos debido a la pendiente de hecho llegan a ser los mismos, ya que el peso del camión y la ruta es la misma. Los datos de consumo por resistencia a la inercia también se han querido aislar de la gráfica 31, ya que, como se ha comprobado anteriormente, no tienen una gran influencia entre las diferencias de consumo.

Circulando por ciudad esto no podría afirmarse debido a los continuos cambios en la velocidad del vehículo.

La gráfica 32 es la resultante de estas simplificaciones. Se puede ver fácilmente que las columnas de valores de consumo debido a la resistencia aerodinámica en el viaje 3 (barras naranjas) son mayores que las del viaje 1 (barras azules).

Como se explicó anteriormente el viaje 1 dio un consumo de 46,76 l/100 km mientras que en el tercer viaje fue de 50,48 l/100 km. Una diferencia de 3,72 l/100km y un total de 9,672 litros a lo largo de los 263,1 km de estudio. Por lo tanto, la parte de las barras naranjas que sobresale a las azules representa esos 9,672 litros. Prácticamente en todo momento de la ruta el consumo es mayor en el viaje 3 debido a los valores altos de velocidad de viento, recordemos que en el primer viaje prácticamente hay ausencia del viento en todo instante.



Gráfica 32. Consumo debido a la resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell (viaje 1 y 3). Columnas azules: consumo de Diesel en el viaje 1. Columnas naranjas: consumo de Diesel en el viaje 3. Fuente: propia.

Se puede observar que hay tramos donde este consumo de Diesel es nulo. Esto es debido a las pendientes. Si en un tramo existe una pendiente negativa cuyo valor de resistencia es mayor que la suma del resto que se oponen al avance del vehículo, en ese tramo no habrá consumo, el conductor se limitará a soltar el pie del acelerador y dejar que el camión se desplace cuesta abajo. Por lo tanto, aunque el viento le esté afectando, no habrá gasto en carburante.

El mismo análisis se podría hacer con respecto a las emisiones de CO₂ en ambos viajes al ser proporcional al consumo. Se emiten 0,000073250 gr de CO₂ a la atmósfera por cada Julio. Un total de 323,18 kg en el primer viaje y de 348,87 kg en el segundo.

6. Análisis de resultados en los 18 viajes

Una vez se ha demostrado que las variaciones de velocidad del viento en carretera tienen influencia en cambios de resistencia aerodinámica y por lo tanto en el consumo de Diesel y emisiones de CO₂ queda por analizar los resultados en los 18 viajes y como se relacionan entre ellos.

Anteriormente se han analizado dos viajes con características de viento extremas, un día con valores nulos de velocidad de viento (viaje 1) y otro con datos de velocidad de viento altos (viaje 3). El resto de los viajes tienen características de viento que se encuentran entre estas dos situaciones. Los resultados de la tabla 8 son resultado del análisis de todos los viajes del Duotrailer en la ruta Zaragoza (PLAZA) – Martorell (PKW) durante el mes de junio.

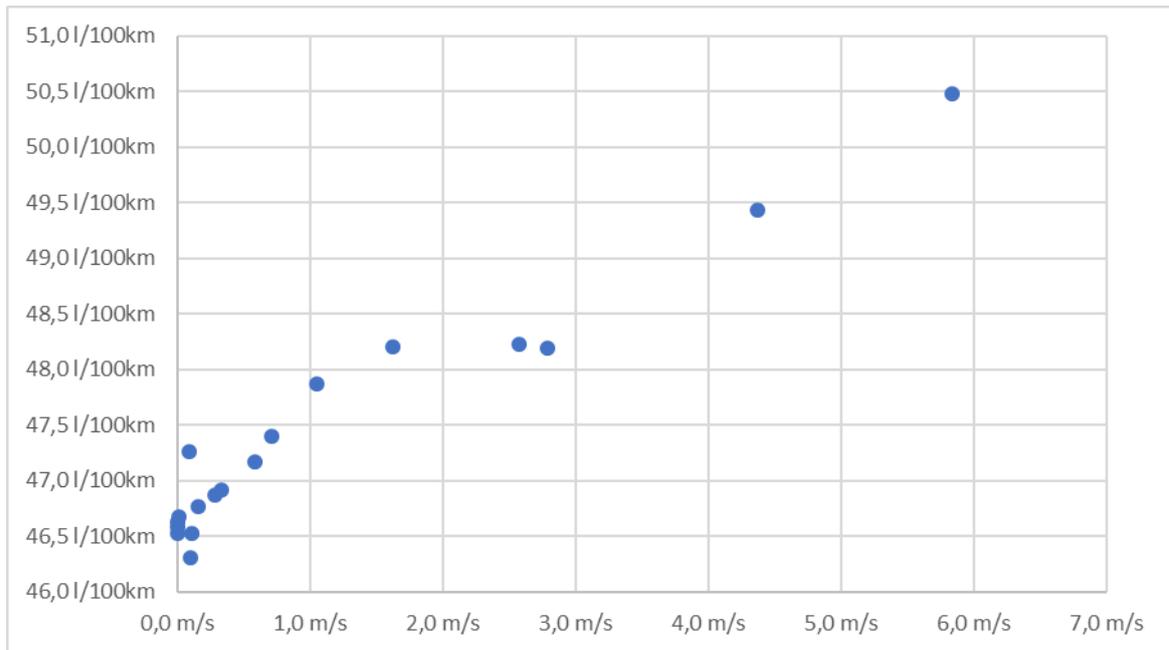
Tabla 8. Valores de velocidad media del viento en carretera, velocidad media del camión, factor de impedancia, consumo de Diesel, emisiones de CO₂ y valores medio por tramo de las distintas resistencias en cada uno de los 18 viajes estudiados en la ruta Zaragoza – Martorell. Fuente: propia.

	VEL MEDIA VIENTO	VEL CAMIÓN	FACTOR IMPEDANCIA	RESIST. INERCIA	RESIST. AERO	RESIST. RODADURA	EMISIONES CO2	CONSUMO
1	0,156 m/s	23,361 m/s	1,271	203,2 N	2196,5 N	3793,3 N	323,18 Kg	46,76 L/100km
2	0,014 m/s	23,345 m/s	1,271	163,6 N	2161,8 N	3789,6 N	322,62 Kg	46,68 L/100km
3	5,839 m/s	23,032 m/s	1,818	231,2 N	3314,7 N	3773,0 N	348,87 Kg	50,48 L/100km
4	0,000 m/s	23,918 m/s	1,759	153,3 N	2253,8 N	3818,1 N	321,94 Kg	46,58 L/100km
5	2,574 m/s	23,413 m/s	1,360	225,3 N	2675,8 N	3791,1 N	333,34 Kg	48,23 L/100km
6	4,370 m/s	22,372 m/s	1,147	214,7 N	2959,1 N	3763,1 N	341,63 Kg	49,43 L/100km
7	2,788 m/s	22,619 m/s	0,716	230,5 N	2618,9 N	3758,3 N	333,10 Kg	48,20 L/100km
8	0,000 m/s	23,144 m/s	1,700	173,3 N	2125,0 N	3778,9 N	322,30 Kg	46,64 L/100km
9	0,110 m/s	22,533 m/s	1,563	282,1 N	2046,5 N	3749,0 N	321,58 Kg	46,53 L/100km
10	0,284 m/s	23,789 m/s	1,429	125,5 N	2286,3 N	3812,0 N	323,97 Kg	46,88 L/100km
11	0,706 m/s	23,254 m/s	1,264	240,8 N	2295,9 N	3789,4 N	327,61 Kg	47,40 L/100km
12	0,091 m/s	23,888 m/s	1,129	242,8 N	2280,7 N	3822,3 N	326,64 Kg	47,26 L/100km
13	1,047 m/s	23,770 m/s	0,965	279,7 N	2458,3 N	3817,1 N	330,87 Kg	47,88 L/100km
14	0,583 m/s	23,349 m/s	1,563	391,2 N	2285,1 N	3794,2 N	326,01 Kg	47,17 L/100km
15	1,619 m/s	23,700 m/s	0,980	283,9 N	2562,2 N	3813,7 N	333,16 Kg	48,21 L/100km
16	0,000 m/s	23,241 m/s	1,714	154,4 N	2145,3 N	3785,8 N	321,57 Kg	46,53 L/100km
17	0,101 m/s	22,901 m/s	2,054	183,3 N	2101,0 N	3767,7 N	320,06 Kg	46,31 L/100km
18	0,333 m/s	22,984 m/s	2,438	260,8 N	2177,9 N	3778,9 N	324,27 Kg	46,92 L/100km

Los valores de resistencia de esta tabla 8 son valores medios por tramo.

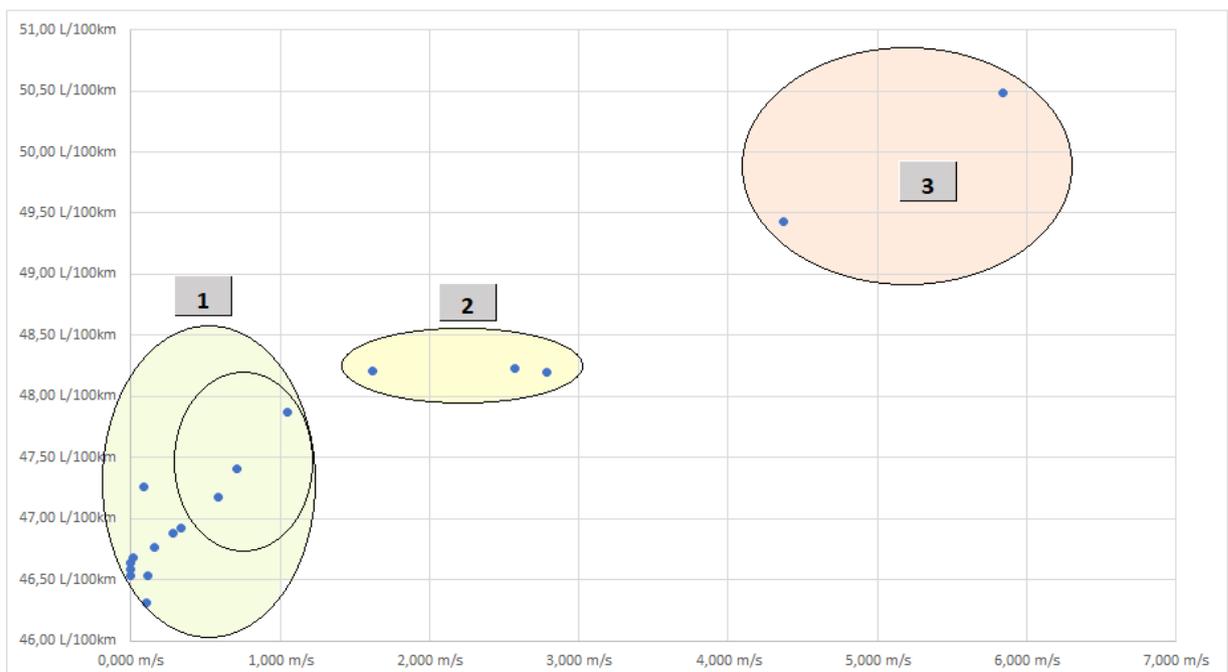
Los cálculos en cada uno de los viajes han seguido la metodología anteriormente expuesta. Cabe recordar que la velocidad del viento es la media que le ha estado afectando frontalmente al camión a lo largo de la ruta. A simple vista no se puede ver un patrón que relacione los resultados por lo que se ha decidido primero analizar gráficamente el consumo de combustible con la velocidad media del viento en carretera. Los resultados se pueden ver en la gráfica 33.

6. Análisis de resultados en los 18 viajes



Gráfica 33. Consumo en función de la velocidad media del viento en la ruta Zaragoza - Martorell para cada uno de los 18 viajes estudiados. Fuente: propia.

Analizando la gráfica 33 se puede ver una tendencia, a mayor velocidad del viento se producen mayores consumos, llegando a consumir 50,50 l/100 km a una velocidad de viento cercana a los 5,8 m/s (20,88 km/h). Este valor máximo de consumo corresponde al viaje número 3 que se ha estudiado anteriormente. Se puede ver también que la gran mayoría de días la velocidad del viento no supera el valor de 1 m/s. A simple vista se puede ver que existen 3 zonas diferenciadas en la gráfica 33. Por ello se ha querido analizar cada una por separado. Se han marcado visualmente estas 3 zonas en la gráfica 34.



Gráfica 34. Consumo en función de la velocidad media del viento en la ruta Zaragoza - Martorell para cada uno de los 18 viajes estudiados. Fuente: propia.

- Zona 1:

Esta primera zona se caracteriza por una gran acumulación de resultados. A velocidades de viento tan bajas (< 1 m/s) se puede ver que su influencia en el consumo no es determinante y se acumulan de forma más o menos aleatoria entre valores de 46,5 l/100 km y 47,00 l/100 km. Aunque dentro de esta primera zona, rodeada en el círculo de menor radio, se puede ver ya que a velocidades cercanas a 1 m/s, los incrementos de consumo se deben al mismo efecto en la velocidad del viento. Las variaciones de consumo de Diesel entre viajes a estas bajas velocidades de viento, por lo tanto, estarán condicionadas por la velocidad del camión, la resistencia a la inercia y el viento casi de igual manera.

Recordemos que la resistencia a la pendiente es igual en todos los viajes, por lo que las variaciones de consumo de Diesel que se ven en la gráfica no corresponden a este factor. El consumo debido a la resistencia de rodadura también se considera que no va a provocar grandes diferencias ya que el coeficiente de rodadura es prácticamente constante. Fundamentalmente, por lo tanto, el consumo en esta zona de baja velocidad de viento viene influenciado por:

- Resistencia aerodinámica (determinada en su gran mayoría por la velocidad del camión)
- Resistencia a la inercia (paradas en estaciones de servicio y peajes y tráfico en el viaje)

No podemos asegurar que en esta primera zona el viento sea un factor determinante en variaciones de consumo de combustible.

- Zona 2:

En esta zona las velocidades del viento empiezan a ser altas (1,5 m/s – 3 m/s). El consumo alcanza valores mayores que en la zona 1 (48,25 l/100 km). Parece raro que el incremento de velocidad de viento no provoque aumento en el consumo y que sin embargo este se mantenga constante. Analizando los resultados de estos 3 puntos en la tabla 9 se puede determinar que la causa es la resistencia de inercia promedio por tramo en cada uno de los viajes.

Tabla 9. Consumo de Diesel, resistencia a la inercia media por tramo y velocidad media del viento en la ruta Zaragoza - Martorell. Viajes 15, 5 y 7. Fuente: propia.

	VEL MEDIA VIENTO	CONSUMO	RESIST. INERCIA
15	1,619 m/s	48,21 L/100km	283,9 N
5	2,574 m/s	48,23 L/100km	225,3 N
7	2,788 m/s	48,20 L/100km	230,5 N

Se puede ver que, aunque al viaje 7 le esté afectando mayor velocidad de viento frontal al camión que al 15, el consumo es parecido. Esto es debido a la resistencia por inercia. Si se comparan los valores de resistencia de inercia media, se puede ver que la diferencia de consumo producido por la diferencia de velocidad viento se compensa con la diferencia de valores de resistencia a la inercia.

Lo mismo sucede entre el punto 15 y el 5, ya que el viaje 5 tiene prácticamente las mismas características que el 7.

Por lo tanto, en esta zona no se puede asegurar que un incremento del viento vaya a producir el mismo efecto en el consumo.

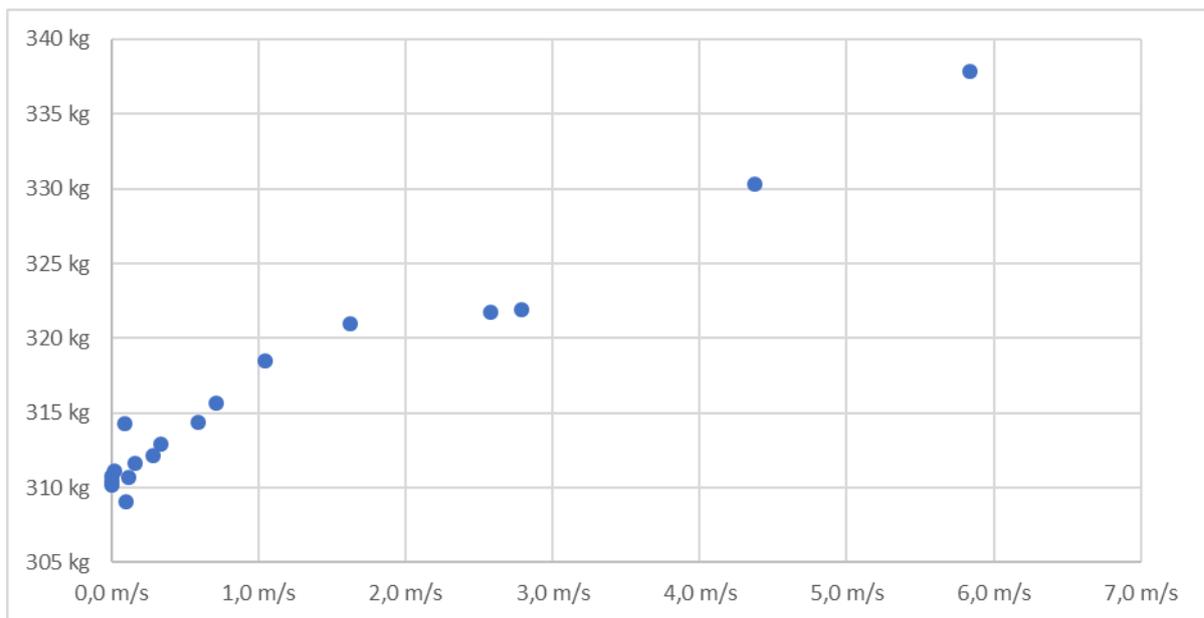
- Zona 3:

En esta última zona ya se puede ver claramente la influencia del viento en el consumo. Se observa una tendencia ascendente. Esta es la primera vez que se encuentra la correspondencia entre aumento en la velocidad de viento y el mismo efecto en el consumo de combustible que se buscaba.

Podemos asegurar entonces que solo a una alta velocidad del viento (4 m/s), esta variable empieza a ser determinante en variaciones de consumo. Mientras el valor sea inferior a 4 m/s no podemos asegurar que un incremento de viento provoque el mismo efecto en el consumo ya que, este, estará influenciado también por otras variables. Se podría decir que su efecto se “camufla” entre otros factores.

Se va a estudiar a continuación como se relacionan el resto de variables estudiadas en los 18 viajes.

La velocidad del viento afectará de la misma forma al consumo que a las emisiones de CO₂ a la atmosfera. Ambos factores, consumo de Diesel y emisiones de CO₂, son proporcionales, por lo que en este caso la gráfica será parecida al anterior caso expuesto. Los resultados se pueden ver en la gráfica 35. En ella se puede comprobar que los resultados de emisiones se disponen de igual manera que en la gráfica 33, se distinguen por lo tanto las mismas zonas y comparten el mismo análisis que se realizó anteriormente.



Gráfica 35. Velocidad del viento y emisiones de CO₂ en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia

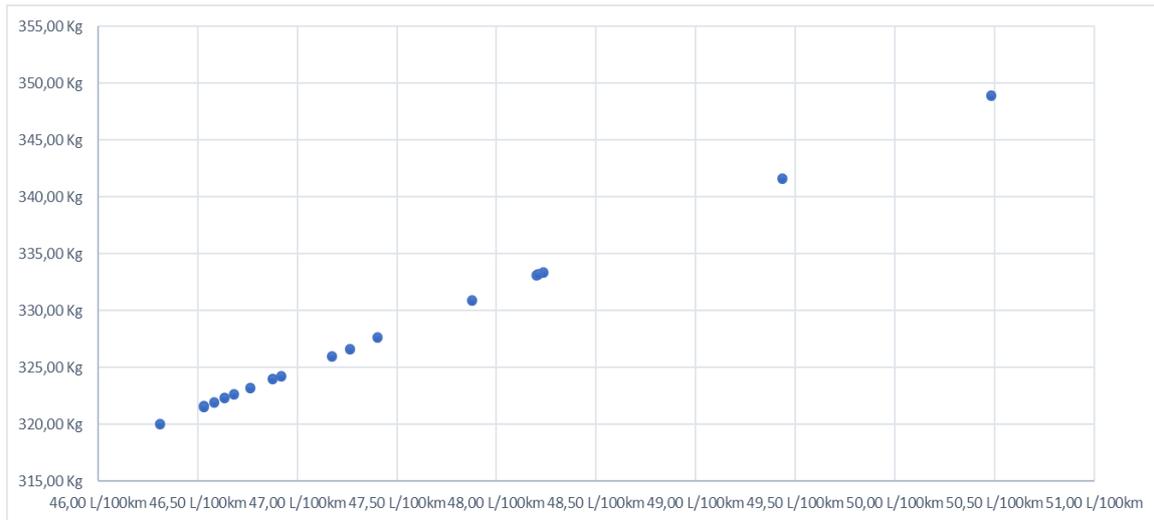
6. Análisis de resultados en los 18 viajes

Esta relación como se ha comentado entre consumo y emisiones se puede comprobar en la gráfica 36. En ella se puede ver que los puntos se alinean y forman una línea perfecta y una pendiente constante, esto es debido a que un incremento de consumo produce proporcionalmente el mismo efecto en las emisiones de CO₂.

La ecuación de la recta será, por lo tanto:

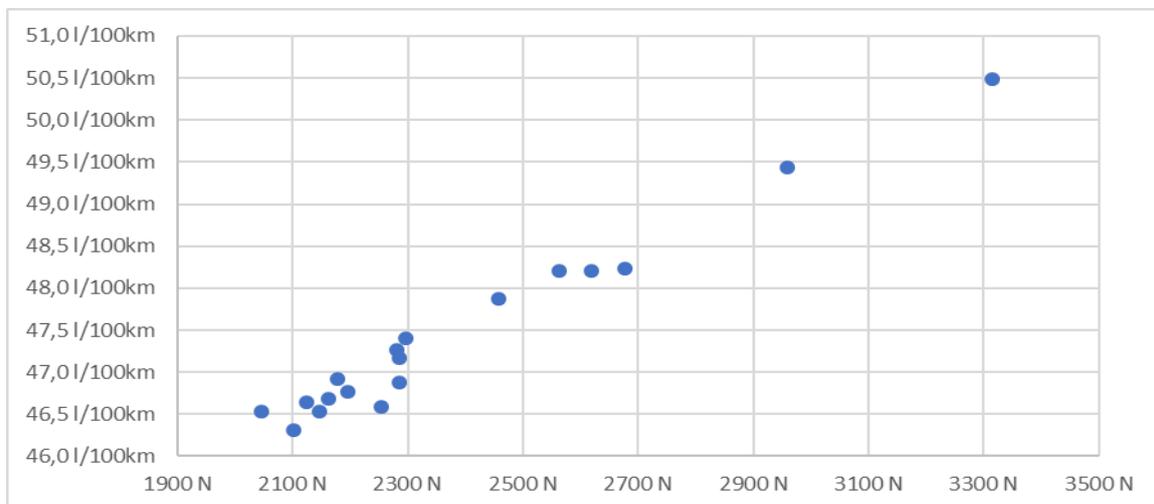
$$Y \text{ [kg]} = 6,911x \text{ [l/km]} - 8E-11$$

Siendo “y” las emisiones y “x” el consumo.



Gráfica 36. Consumo y emisiones en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia.

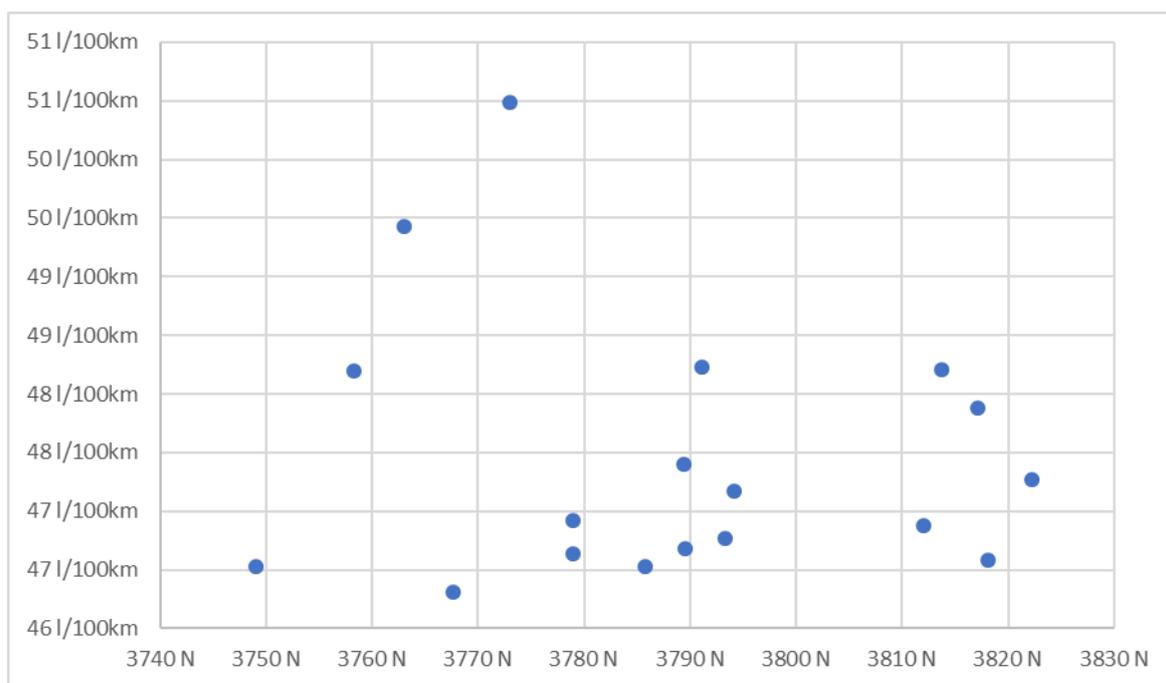
La resistencia aerodinámica cabe esperar que sea un factor diferencial en la diferencia de consumo de Diesel entre los 18 viajes. Se ha querido representar en la gráfica 37 el consumo frente a la resistencia aerodinámica media por tramo de cada viaje. Como se podía esperar, su influencia es total en el consumo. La tendencia es claramente positiva, por lo que se puede asegurar que las variaciones de consumo son debidas al mismo efecto en este tipo de resistencia.



Gráfica 37. Consumo frente a resistencia aerodinámica media por tramo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia

6. Análisis de resultados en los 18 viajes

La resistencia a la rodadura es prácticamente constante en todos los viajes. Como se ha comentado el peso es el mismo en todos los casos, mientras que el coeficiente de rodadura apenas cambia con la velocidad e incluso se podría haber considerado constante. Por lo tanto, como se podía esperar, no va a ser determinante en las diferencias de consumo entre viajes. Se puede comprobar visualmente en la gráfica 38. Los valores de resistencia media por tramo a la rodadura en los 18 viajes se orientan de forma aleatoria en la gráfica sin seguir ningún tipo de patrón.



Gráfica 38. Consumo y resistencia media por tramo a la rodadura en la ruta Zaragoza – Martorell en todos los viajes analizados. Fuente: propia.

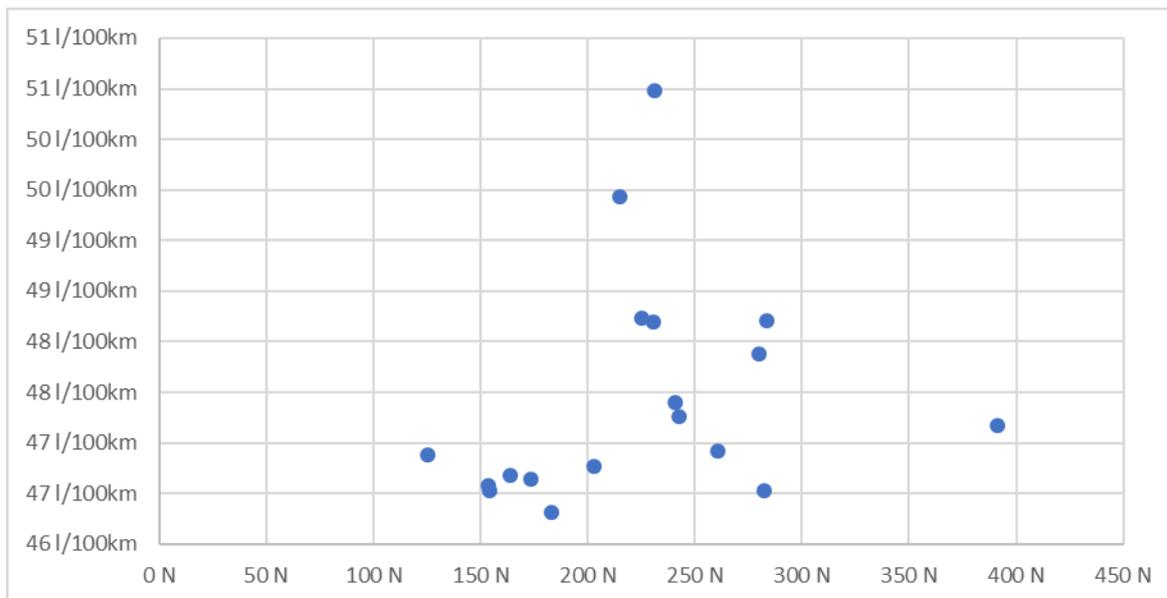
Podemos asegurar entonces que la resistencia por rodadura no es un factor determinante en las variaciones de consumo entre viajes.

La resistencia a la inercia es otro aspecto a estudiar. Al ser viajes por carretera esperamos que este factor tampoco sea determinante en diferencias de consumo. Los valores de resistencia a la inercia son parecidos entre viajes ya que hay paradas en peajes obligadas que los camiones tienen que realizar. Esto solo sucede en carretera. En ciudad se producirían mayores diferencias entre consumos debido a paradas en semáforos o tráfico.

Se ha querido mostrar el efecto de la resistencia por inercia en el consumo en la gráfica 39. Como se puede ver, la orientación de los valores medios por tramo en cada uno de los 18 viajes de esta resistencia no siguen ninguna pauta y están dispuestos en el área del gráfico de forma aleatoria.

Por lo tanto, al igual que ocurría con la resistencia por rodadura, tampoco se puede asegurar que un incremento o decremento de valores de inercia vaya a producir el mismo efecto en el consumo de Diesel.

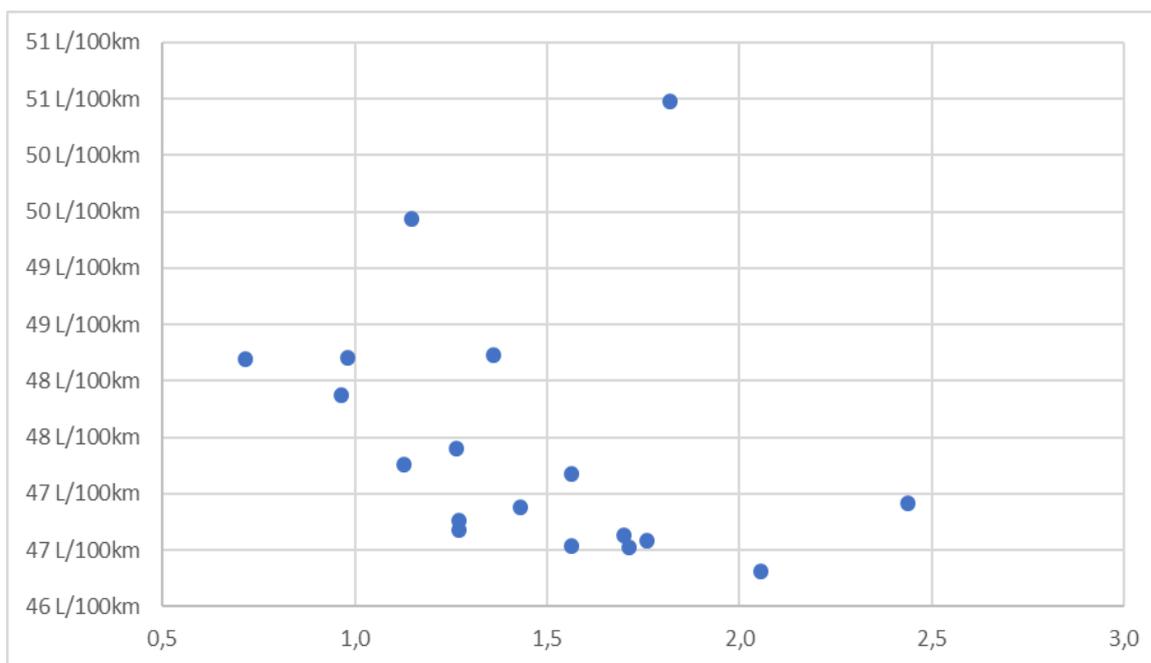
6. Análisis de resultados en los 18 viajes



Gráfica 39. Resistencia a la inercia media por tramo y consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia.

El factor de impedancia o tráfico es otro aspecto a tener en cuenta en el estudio. Como se ha explicado y demostrado anteriormente, el tráfico prácticamente solo le afecta al vehículo al final de la ruta, cuando se aproxima a Barcelona. Es de esperar entonces que le influya casi siempre de la misma manera al ser un viaje en carretera y haber siempre el mismo tipo de tráfico entre viajes.

Se puede comprobar que lo anteriormente es cierto en la gráfica 40. En ella se puede ver que la disposición de los distintos factores de impedancia o tráfico vuelve a ser aleatoria. Las diferencias de consumo entre los 18 viajes no han sido debido al tráfico, por lo tanto.



Gráfica 40. Factor de impedancia o tráfico y consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia.

6. Análisis de resultados en los 18 viajes

La influencia en las diferencias de consumo de la resistencia a la pendiente se considera nula. El gasto en combustible debido a esta resistencia va a ser siempre el mismo en los 18 viajes analizados.

Una vez analizados todos estos factores, se puede llegar a la conclusión que la única resistencia que ha sido el principal causante de las diferencias en el consumo de Diesel entre viajes ha sido la resistencia aerodinámica. Esta, depende de 5 términos:

- Coeficiente aerodinámico
- Densidad del aire
- Área frontal del vehículo
- Velocidad del camión
- Velocidad del viento

En este trabajo al considerar las 3 primeras constantes, se puede afirmar que las variaciones de resistencia aerodinámica y por lo tanto del consumo de Diesel son debidas al mismo efecto en la velocidad del camión y del viento. Para estudiar este efecto se ha querido ver la influencia por separado y junto de ambas velocidades en los valores de resistencia aerodinámica. Para ello se han dispuesto los resultados a analizar en la tabla 10. En ella se puede ver tanto la velocidad media del viento frontal que le afectó al camión en la ruta como la velocidad media del camión a lo largo de los 263,1 km de estudio.

Tabla 10. Velocidad media del viento, del camión, total y resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia

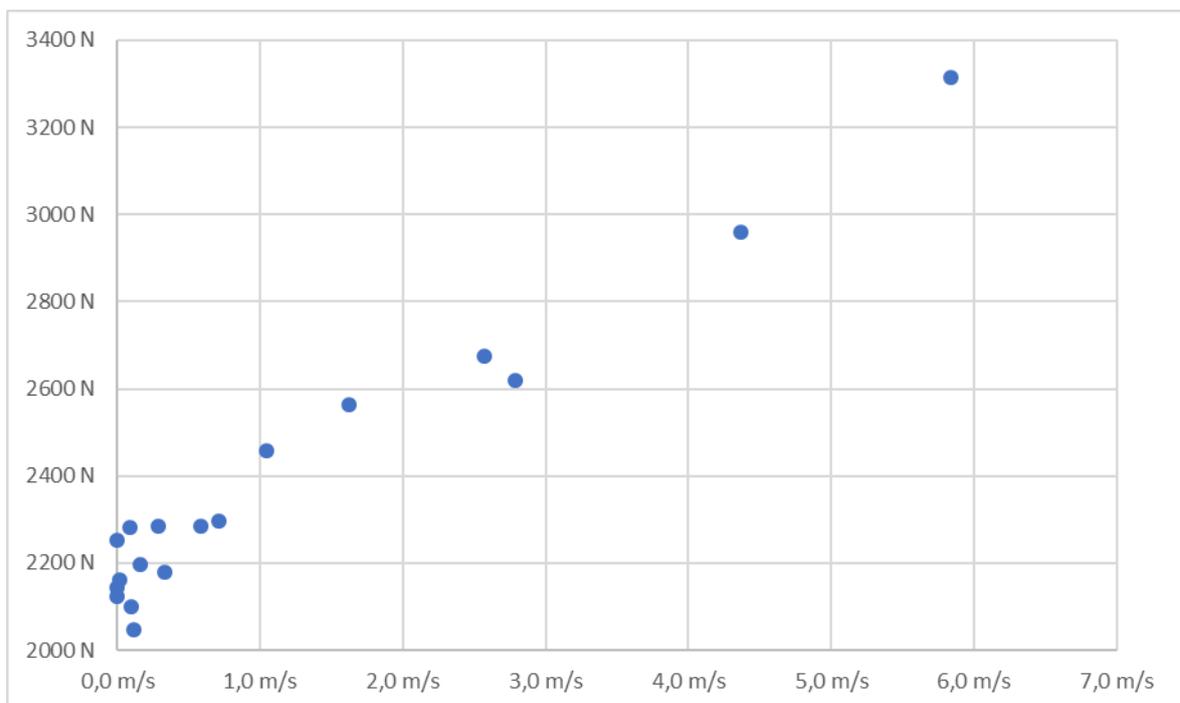
	VEL MEDIA VIENTO	VEL CAMIÓN	VEL TOTAL	RESIST. AERO
1	0,156 m/s	23,361 m/s	23,517 m/s	2196,5 N
2	0,014 m/s	23,345 m/s	23,359 m/s	2161,8 N
3	5,839 m/s	23,032 m/s	28,871 m/s	3314,7 N
4	0,000 m/s	23,918 m/s	23,918 m/s	2253,8 N
5	2,574 m/s	23,413 m/s	25,988 m/s	2675,8 N
6	4,370 m/s	22,372 m/s	26,742 m/s	2959,1 N
7	2,788 m/s	22,619 m/s	25,407 m/s	2618,9 N
8	0,000 m/s	23,144 m/s	23,144 m/s	2125,0 N
9	0,110 m/s	22,533 m/s	22,643 m/s	2046,5 N
10	0,284 m/s	23,789 m/s	24,074 m/s	2286,3 N
11	0,706 m/s	23,254 m/s	23,960 m/s	2295,9 N
12	0,091 m/s	23,888 m/s	23,979 m/s	2280,7 N
13	1,047 m/s	23,770 m/s	24,817 m/s	2458,3 N
14	0,583 m/s	23,349 m/s	23,932 m/s	2285,1 N
15	1,619 m/s	23,700 m/s	25,319 m/s	2562,2 N
16	0,000 m/s	23,241 m/s	23,241 m/s	2145,3 N
17	0,101 m/s	22,901 m/s	23,002 m/s	2101,0 N
18	0,333 m/s	22,984 m/s	23,317 m/s	2177,9 N

6. Análisis de resultados en los 18 viajes

Se va a analizar gráficamente la influencia de ambas velocidades, viento y camión, en la resistencia aerodinámica para comprobar realmente el factor a tener en cuenta cuando queremos reducir el consumo en el viaje. En la gráfica 41 se puede ver la influencia de la velocidad del viento en la resistencia aerodinámica y en la 42 la de la velocidad del camión. Mientras que en la gráfica 41 puede apreciarse correspondencia entre variaciones de valores, en la 42 sucede todo lo contrario y los valores parecen disponerse de forma aleatoria.

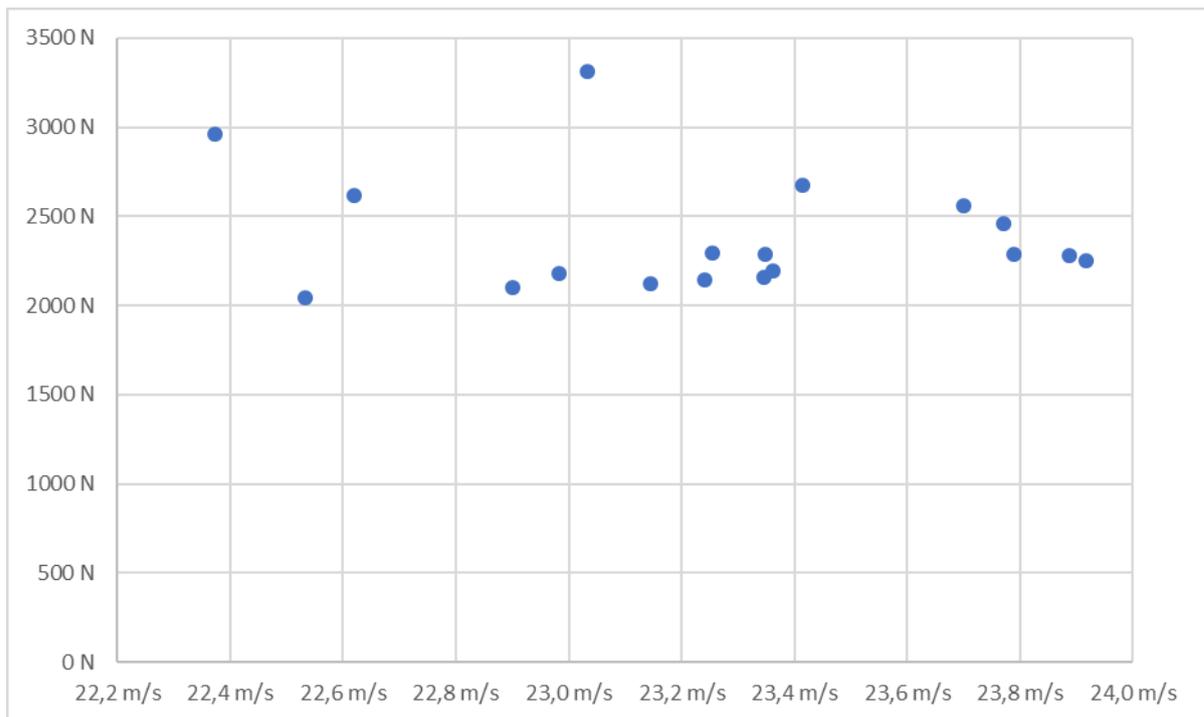
Como se puede ver en las gráficas, puede parecer extraño que la velocidad del viento tenga mayor influencia en las variaciones de resistencia aerodinámica del camión que la del propio vehículo. Al ser la velocidad media del Duo Trailer ($22 \text{ m/s} \approx 23 \text{ m/s}$) mayor que la de viento ($0 \text{ m/s} \approx 5 \text{ m/s}$) hace pensar que su influencia debe ser mayor. Esto no se cumple debido al rango de valores en el que se mueve cada variable. Mientras el camión está en un rango de $\pm 0,773 \text{ m/s}$ (valor máximo: $23,918 \text{ m/s}$, valor mínimo: $22,372 \text{ m/s}$), los valores de velocidad del viento se mueven en torno a $\pm 2,9195 \text{ m/s}$ (valor máximo: $5,839 \text{ m/s}$, valor mínimo: 0 m/s). Es decir, un alto valor de velocidad de vehículo puede no provocar el mismo efecto en la resistencia aerodinámica si el valor de velocidad del viento es nulo. Pero, sin embargo, un alto valor de velocidad del viento va a provocar irremediablemente el mismo efecto en la resistencia aerodinámica a pesar de un bajo valor de velocidad del camión.

Queda demostrado entonces que la velocidad del viento en carretera en esta ruta, bajo las condiciones de velocidad que el camión tiene que cumplir, tiene mayor influencia en variaciones de resistencia aerodinámica que la propia velocidad del camión.



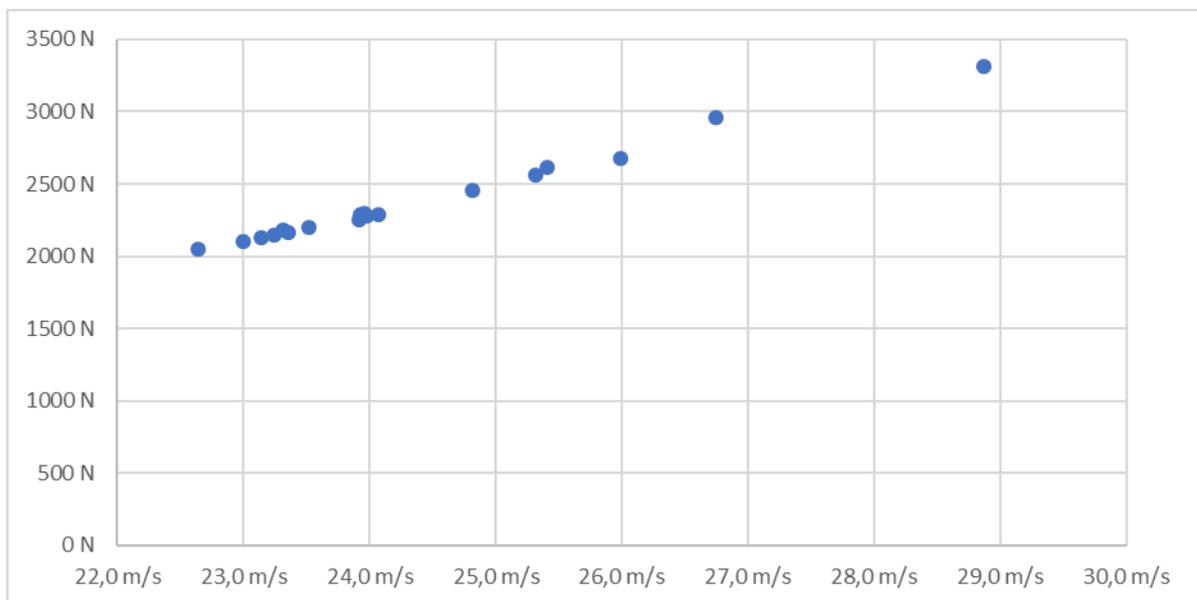
Gráfica 41. Velocidad del viento frente a resistencia aerodinámica en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes.
Fuente: propia.

6. Análisis de resultados en los 18 viajes



Gráfica 42. Resistencia aerodinámica frente a velocidad del vehículo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia

Como se puede esperar, la suma de ambas velocidades evidentemente tiene total correspondencia con los valores de resistencia aerodinámica. Sus valores se aproximan a una línea prácticamente recta de tendencia claramente ascendente como se puede ver en la gráfica 43.



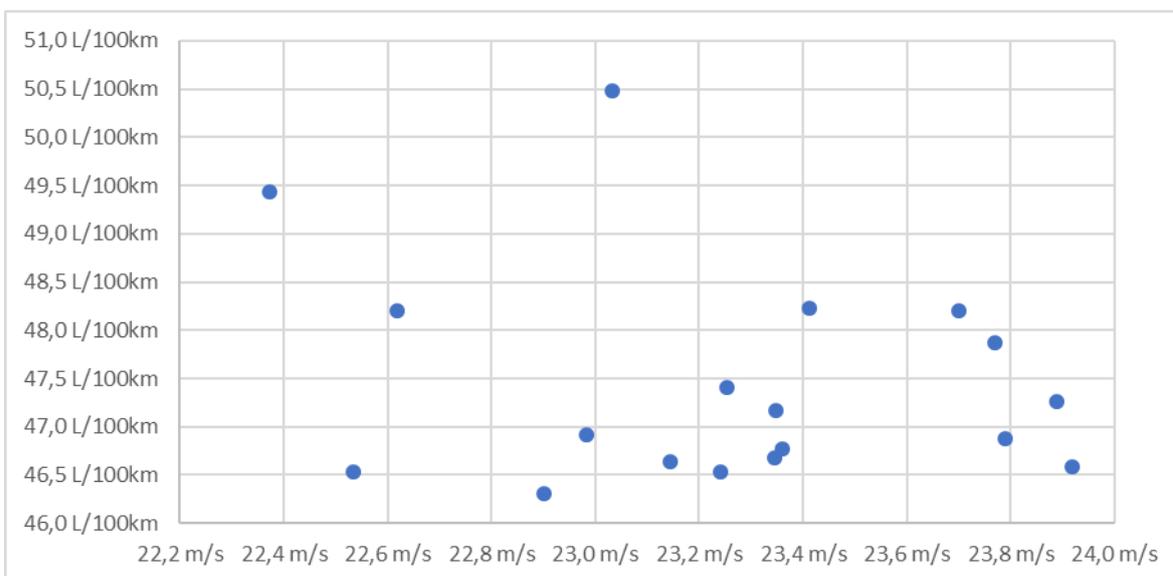
Gráfica 43. Suma de la velocidad del viento y del camión frente al consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia.

El mismo análisis se podría hacer en relación al consumo y la resistencia aerodinámica. Cabe esperar que las diferencias de velocidad del viento sean más determinantes que las del camión en las diferencias de consumo de Diesel

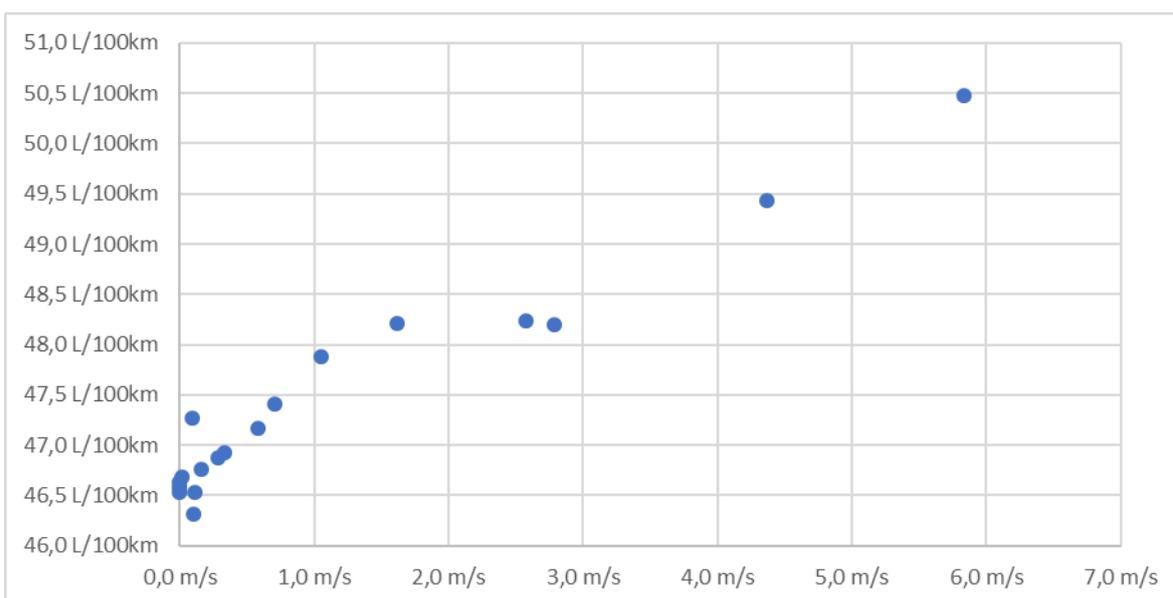
entre viajes. Esto es debido al rango de valores en los que se mueven ambas variables como se ha explicado anteriormente.

Ya se ha expuesto al principio de este capítulo de qué manera influye el viento al consumo, queda por compararlo con la influencia de la velocidad del vehículo y conjuntamente ambos factores. Esto se puede ver en las gráficas 44, 45 y 46.

Como sucedía anteriormente, se puede comprobar gráficamente que las variaciones de valores de velocidad del camión no tienen el mismo efecto en el consumo (gráfica 44), mientras que lo contrario ocurre con la velocidad del viento (gráfica 45). Se ha querido mostrar en la gráfica 46 que conjuntamente ambas velocidades sí que van a mostrar influencia en variaciones de consumo entre viajes.

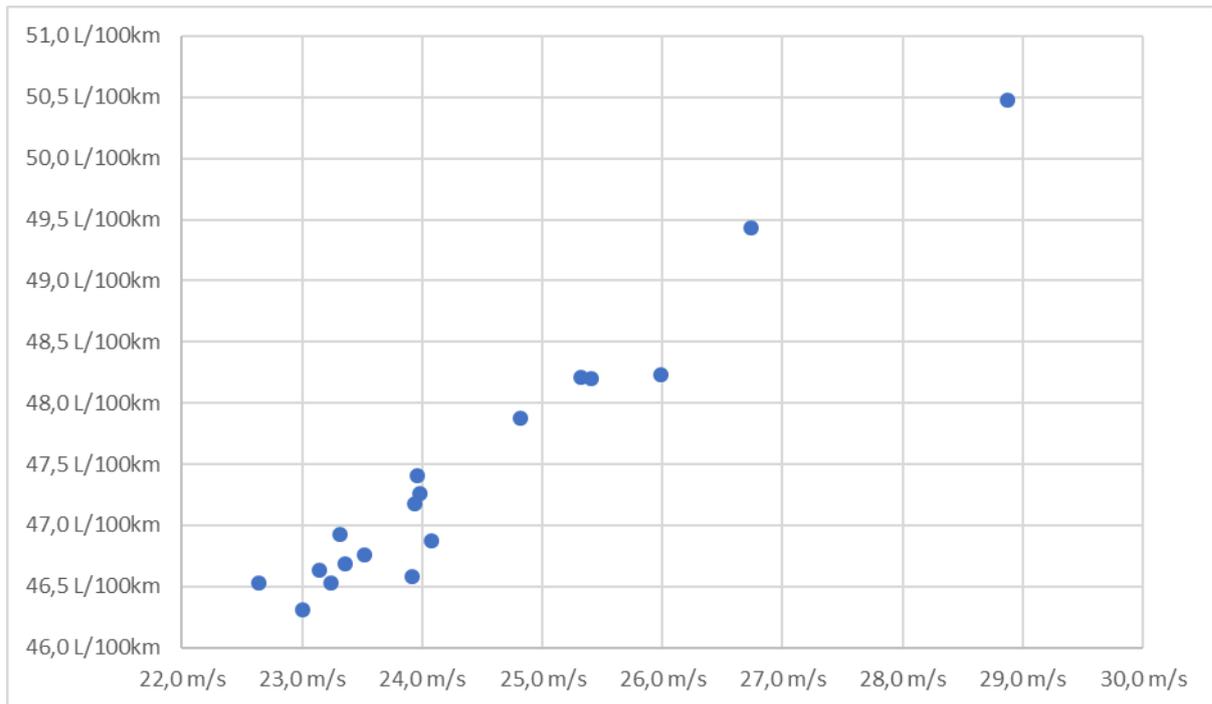


Gráfica 44. Velocidad del camión frente a consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia.



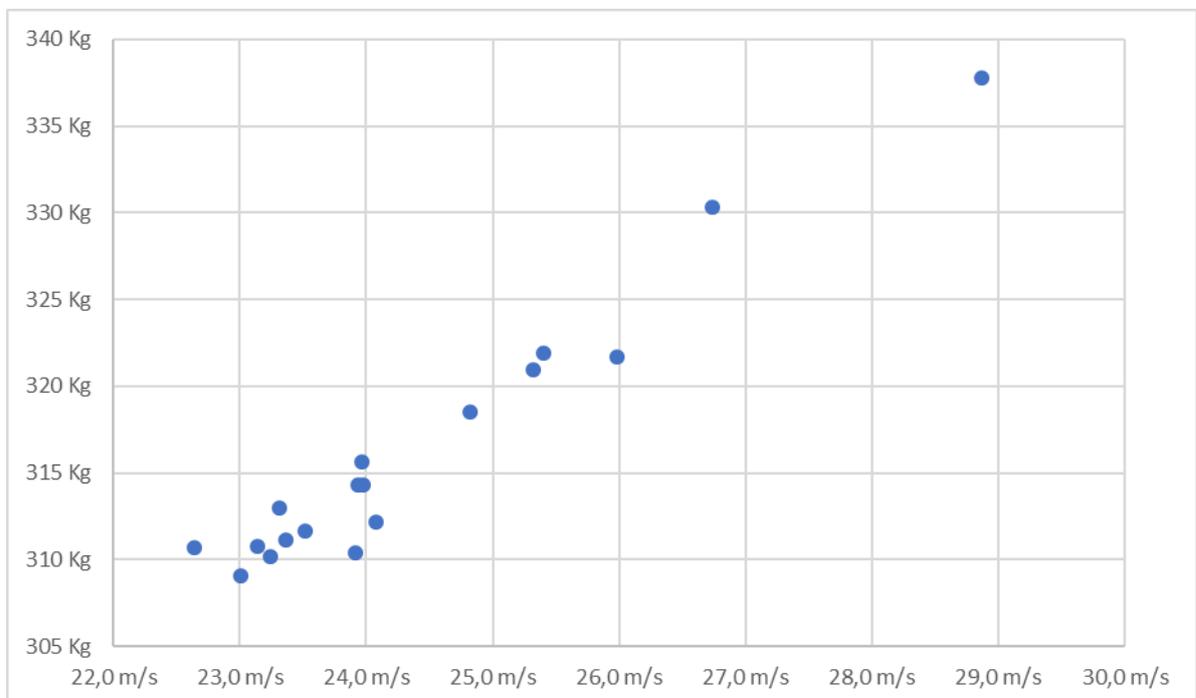
Gráfica 45. Velocidad del viento frente a consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia.

6. Análisis de resultados en los 18 viajes



Gráfica 46. Suma de la velocidad del viento y del vehículo frente a consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia.

El mismo análisis se podría hacer para relacionar ambas velocidades (viento y camión) con las emisiones de CO₂ a la atmosfera. Se ha querido mostrar en la gráfica 47 que al igual que sucedía con el consumo, las variaciones de ambas velocidades influyen de la misma manera en las emisiones. Este es un resultado esperable ya que el consumo y emisiones de CO₂ son proporcionales.



Gráfica 47. Suma de velocidad del viento y vehículo frente a emisiones en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes. Fuente: propia.

7. Conclusión

A lo largo de este trabajo se ha demostrado la influencia que la velocidad del viento en carretera tiene en el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Tener un control del consumo de Diesel en ruta es importante no solo de cara a factores económicos, sino también de cara a cumplir un mínimo de emisiones de CO₂.

Actualmente a los vehículos pesados (Camiones y autobuses) se les atribuye el 27% de las emisiones registradas en carretera, aunque sólo representan al 5% de los vehículos en circulación. Además, el 94% de las emisiones de efecto invernadero del transporte son generadas por el transporte en carretera. Por lo que estudiar los factores que provocan su incremento es fundamental para aplicar tecnologías o técnicas de conducción capaces de reducirlas.



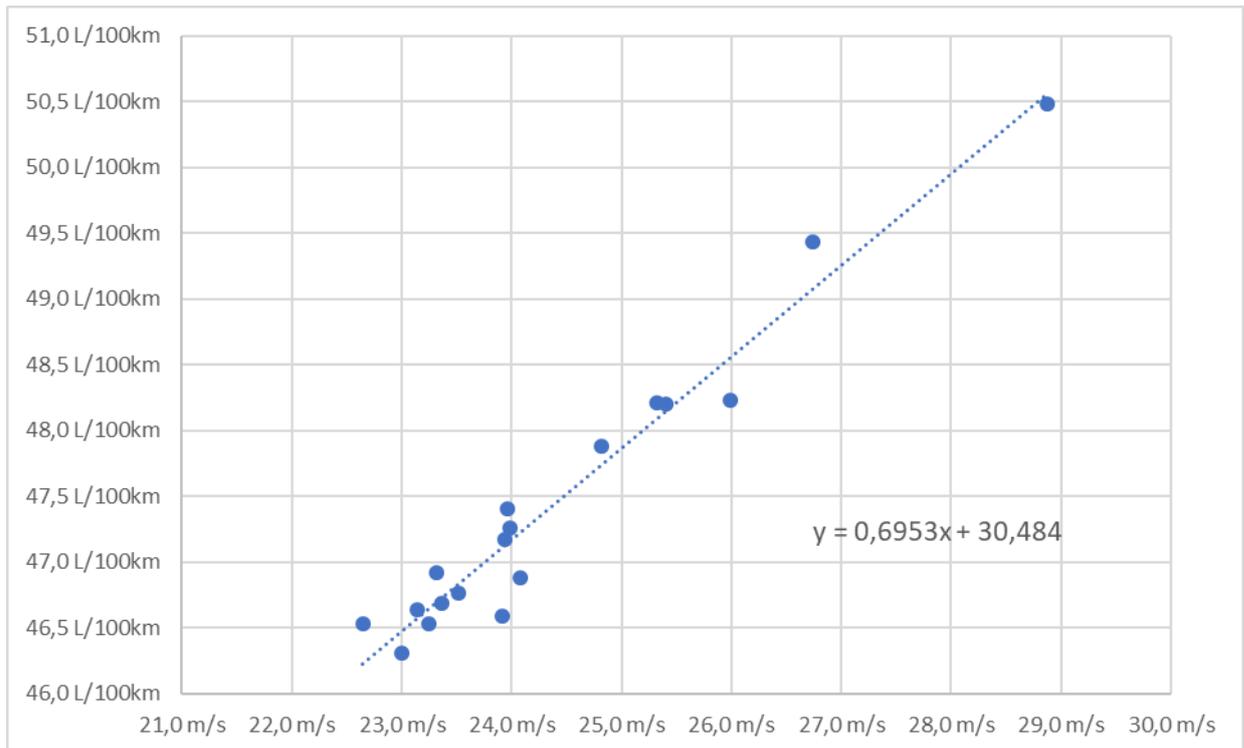
Imagen 20. Proporción de emisiones de CO₂ en distintos tipos de vehículos en carretera. Fuente: UE.

En este trabajo se ha comprobado que la velocidad del viento tiene influencia en el consumo, pero este es un factor que no vamos a poder controlar con objeto de reducir el gasto en combustible y por lo tanto las emisiones. Como se ha demostrado, la diferencia de consumos entre viajes es debido fundamentalmente a la resistencia aerodinámica, determinada por la velocidad del viento y la del camión. Los otros 3 términos de la expresión son constantes y tampoco se van a poder modificar para reducir el consumo. Por lo que únicamente se puede modificar la velocidad del camión para reducir este gasto en combustible.

Trazando la línea de tendencia en la gráfica de suma de la velocidad del camión y el viento frente al consumo se puede mediante la previsión de viento del día en la ruta, determinar la velocidad ideal que tendría que llevar el camión para no superar el umbral de consumo que se decida.

La gráfica 48 muestra la línea de tendencia claramente ascendente.

7. Conclusión



Gráfica 48. Velocidad del viento y del camión frente al consumo en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes.
Fuente: propia.

La línea de tendencia queda:

$$Y = 0,6953X + 30,484$$

Siendo:

Y = consumo de Diesel [l/100km]

X = $x_1 + x_2$

- x_1 = velocidad frontal del viento [m/s]
- x_2 = velocidad del vehículo [m/s]

Determinando un umbral de consumo de Diesel y una velocidad del viento mediante una previsión meteorológica, podremos indicar al conductor la velocidad idónea de conducción para no superar ese umbral. La ecuación despejada quedaría de la siguiente forma:

$$x_2[\text{m/s}] \leq (Y[\text{l}/100\text{km}] - 30,484 - 0,6953 \cdot x_1[\text{m/s}]) / 0,6953$$

Siempre y cuando la velocidad del camión esté en el rango que le indica la expresión anterior, no se estará superando el umbral de consumo.

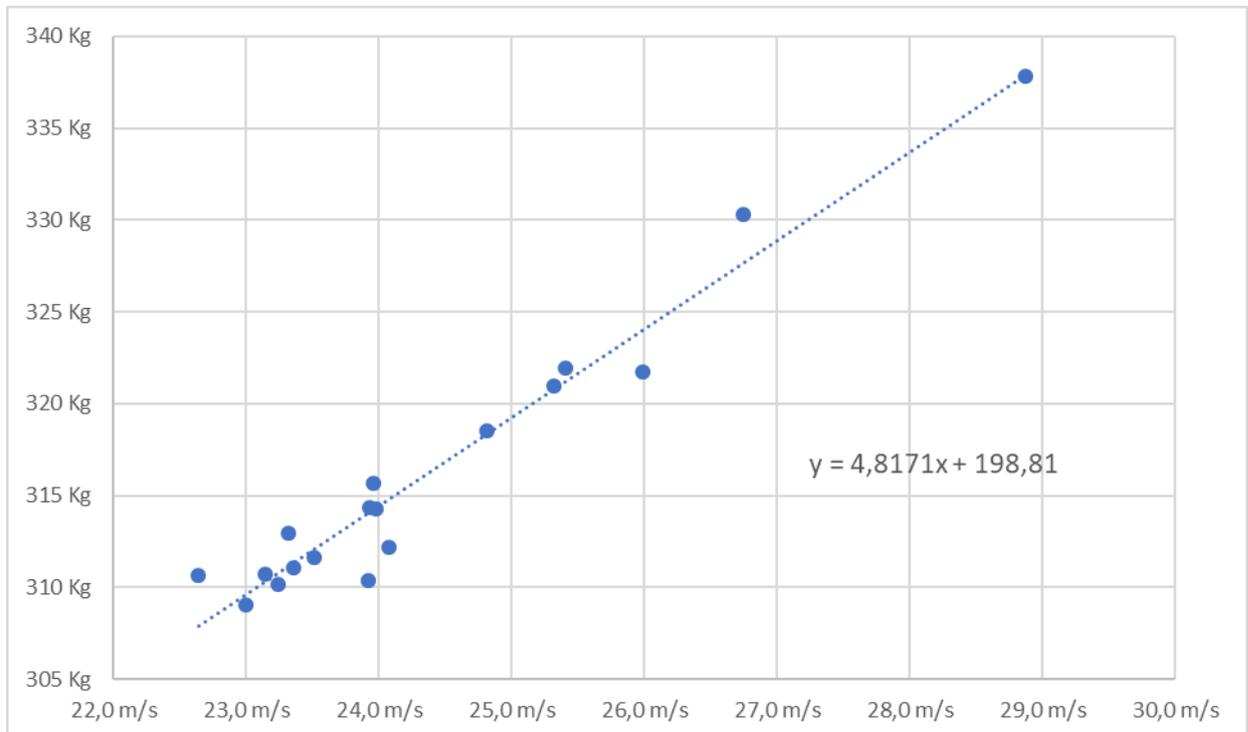
Imaginemos que por motivos económicos no se quiere superar los 49 l/100 km en la ruta y que ese día tenemos una previsión de velocidad de viento de 2 m/s. De acuerdo con la expresión anterior y sustituyendo los valores anteriores nos queda que la velocidad del camión tendrá que ser menor o igual a 24,63 m/s (88,66 km/h). Es decir, si queremos cumplir con ese máximo de consumo (49 l/100km) la velocidad media del camión no deberá superar los 88,66 km/h

7. Conclusión

Como se ha comentado, en la actualidad existe la gran obsesión de reducir las emisiones de CO₂ de los medios de transporte. Conocer con certeza cómo se comportan las diferentes variables en carretera frente a las emisiones es fundamental para poder reducirlas. En el caso que nos concierne se ha estudiado la variable de la velocidad del viento en carretera.

El consumo y las emisiones de CO₂ son proporcionales, por lo que el mismo análisis que se hizo anteriormente respecto al consumo sirve para este caso. La suma de la velocidad del viento y del vehículo es el factor más determinante en variaciones de emisiones de CO₂, tal y como se ha expuesto a lo largo de este trabajo.

Es evidente que la velocidad del viento en carretera es una variable que no vamos a poder cambiar con objeto de reducir emisiones, por lo que únicamente nos queda la posibilidad de modificar la velocidad del camión. En la gráfica 49 se pueden ver los valores de suma de ambas velocidades frente a las emisiones de CO₂ a la atmósfera.



Gráfica 49. Velocidad del viento y vehículo frente a las emisiones de CO₂ a la atmósfera en la ruta Zaragoza - Martorell en los 18 viajes analizados. Fuente: propia.

Como se puede ver gráficamente la línea de tendencia es claramente ascendente. Incrementos de velocidad tendrán el mismo efecto en las emisiones de CO₂.

La expresión de la tendencia es:

$$Y = 4,8171x + 198,81$$

Siendo:

Y = emisiones de CO₂ a la atmósfera [kg]

7. Conclusión

$$X = x1 + x2$$

- $x1$ = velocidad frontal del viento [m/s]
- $x2$ = velocidad del vehículo [m/s]

Determinando un umbral de emisiones y con los datos de la previsión de velocidad de viento que vaya a hacer el día del viaje, se podrá establecer la velocidad óptima del camión para no superar esas emisiones de CO₂ máximas del límite fijado.

La ecuación despejada quedaría de la siguiente forma:

$$x2 \text{ [m/s]} \leq (Y \text{ [Kg]} - 198,81 - 4,8171 \cdot x1 \text{ [m/s]}) / 4,8171$$

Siempre y cuando la velocidad del camión este en el rango que le indica la expresión anterior, no se estará superando el umbral de emisiones de CO₂.

Imaginemos que por motivos medioambientales no se quiere superar los 320 kg de emisiones en la ruta y que ese día tenemos una previsión de velocidad de viento de 2 m/s. De acuerdo a la expresión anterior y sustituyendo los valores anteriores nos queda que la velocidad del camión tendrá que ser menor o igual a 23,15 m/s (83,36 km/h). Es decir, si queremos cumplir con ese máximo de emisiones (320 kg) la velocidad media del camión no deberá superar los 83,36 km/h.

Por lo tanto, a lo largo de este trabajo se ha demostrado la influencia que la velocidad del viento tiene en el consumo de Diesel y las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Se ha conseguido establecer un método con el cual, a partir de la previsión de velocidad de viento en la ruta, calcular la velocidad idónea del camión con el objeto de no superar los umbrales establecidos tanto de consumo de combustible como de emisiones de CO₂.

Referencias bibliográficas

- [1] Martini, H., Bergqvist, B., Hjelm, L., and Löfdahl, L. (2011). *Influence of Different Truck and Trailer Combinations on the Aerodynamic Drag*. Gotemburg: SAE Technical Paper
- [2] *Nrcan*. <https://www.nrcan.gc.ca/>
- [3] *bctransit*. <https://www.bctransit.com/>
- [4] Bauer, H. (1996). *Bosch, manual de la técnica del automóvil*. Barcelona: Editorial Reverte.
- [5] Font, M. (2019). *Estudio de la relación del conjunto neumático-llanta de un automóvil, con el consumo energético y la seguridad vial*. (Trabajo final de carrera). Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa, Barcelona.
- [6] Vehículos automóbiles: Dinámica longitudinal. (10/10/2019). En *Uned*. Recuperado el 11/10/2019 de <http://portal.uned.es/Publicaciones/htdocs/pdf.jsp?articulo=6803406GR02A01>
- [7] Aerodinámica en camiones. (15/9/2019). En *Motorenmarcha*. Recuperado el 17/10/2019 en <http://motorenmarcha.com/aerodinamica-en-camiones/>
- [8] R. Edwards. (2011). *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [9] Técnica gasoleo. (14/09/2019). En *Cepsa*. Recuperado el 16/09/2019 en https://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/Gasoleos/Ficheros_gasoleos/FICHA%20TECNICA%20GASOLEO%20A.pdf.

Anexos

Anexo I

Datos horarios de velocidad y dirección de viento de las 8 estaciones meteorológicas desde el 01/06/2019 hasta el 30/06/2019

Anexo II

Registros del CAN bus del vehículo desde el 01/06/2019 al 29/06/2019

Anexo III

Resultados de cálculo de resistencia aerodinámica, inercia, pendiente, rodadura, energía suministrada por el motor y resistencia total al avance del vehículo en cada uno de los 18 viajes analizados.

Anexo IV

Gráficas de velocidad del vehículo, resistencia aerodinámica, de inercia, velocidad del viento, resistencia total vencida por el motor y resistencia a la rodadura en la ruta Zaragoza – Martorell en los 18 viajes analizados.