



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Diseño y análisis de un vagón de mercancías autopropulsado. Comparación entre tracción diésel, híbrida y eléctrica.

Design and analysis of a self-propelled freight wagon. Comparison between diesel, hybrid and electrical traction

Autor

Juan Manuel Arias Martín

Director

Emilio Larrodé Pellicer

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2019

Resumen

El presente trabajo de fin de máster consiste en el estudio de las prestaciones necesarias para el diseño de un vagón de mercancías autopropulsado. Para ello se ha estudiado el estado de la técnica en el transporte ferroviario, la dinámica de los vehículos ferroviarios y las opciones más habituales en la tracción ferroviaria.

A partir de las ecuaciones que gobiernan la dinámica de los vehículos ferroviarios se han establecido unos escenarios de referencia sobre los que se ha realizado el análisis de las prestaciones. Estos escenarios recogen algunas situaciones habituales en las que podría introducirse un vagón como el que se propone en el trabajo. Se han propuesto diseños para los escenarios contemplados.

Por último, se han resumido las conclusiones alcanzadas durante la realización del trabajo y se han propuesto posibles líneas futuras para complementar el trabajo.

Índice

Resumen	2
1. Introducción.....	11
1.1 Objeto y justificación	11
1.2 Alcance.....	11
1.3 Objetivos.....	12
2. Estado del arte / de la técnica	13
3. Características que definen el movimiento del ferrocarril.....	15
3.1 Curvas de resistencia	15
3.1.1 Resistencia a la rodadura	15
3.1.2 Resistencia debida a cajas de grasa.....	16
3.1.3 Resistencia aerodinámica	16
3.1.4 Resistencia debida a curvas.....	16
3.1.5 Resistencia debida a las rampas	16
3.1.6 Resistencias totales a velocidad constante	17
3.1.7 Resistencias de inercia.....	17
3.1.8 Resistencia al arranque	17
3.2 Curvas de potencia	18
3.3 Curvas de adherencia	19
4. Alternativas de tracción.....	21
4.1 Tracción diésel	21
4.2 Tracción eléctrica.....	22
4.3 Tracción híbrida	23
5. Hipótesis de cálculo	24
5.1 Definición de escenarios.....	24
5.2 Selección de escenarios	26
5.2.1 Escenario 1.....	26
5.2.2 Escenario 2.....	26
5.2.3 Escenario 3.....	27
5.2.4 Escenario 4.....	27
6. Cálculo de características técnicas y prestaciones por escenario.....	28
6.1 Parametrización de las variables	28
6.1.1. Variables generales.....	28

6.1.2 Variables de rodadura	28
6.1.3 Variables aerodinámicas.....	28
6.1.4 Variables de adherencia	31
6.2 Motores estudiados.....	31
6.3 Cálculos.....	33
6.3.1 Escenario 1.....	33
6.3.2 Escenario 2.....	35
6.3.3 Escenario 3.....	36
6.3.4 Escenario 4.....	37
6.3.5 Resumen	38
7. Análisis y optimización	39
7.1 Procedimiento de cálculo	39
7.1 Procedimiento de ajuste de relaciones de marchas	39
7.2 Escenarios	42
7.2.1 Escenario 1.....	43
7.2.2 Escenario 2.....	47
7.2.3 Escenario 3.....	51
7.2.4 Escenario 4.....	55
8. Obtención de resultados y determinación de diseño final	59
9. Conclusiones.....	60
10. Líneas futuras	62
11. Fuentes de información.....	63
Anexos	65
A I – Curvas características de los motores	66
A II – Cálculos.....	69
Escenario 1.....	69
4 ejes.....	69
2 ejes.....	74
Escenario 2.....	80
4 ejes.....	80
2 ejes.....	84
Escenario 3.....	89
4 ejes.....	89
2 ejes.....	93

Escenario 4.....	99
4 ejes.....	99
2 ejes.....	103

Lista de figuras

Figura 1. Consumo de energía por Unidad de Tráfico para cada medio de transporte en 2016 [OTLE]	13
Figura 2. Vehículo pesado para el mantenimiento del balasto, con tolva de 15m ³ [Plasser].....	14
Figura 3. Diagrama de fuerzas involucradas en la resistencia de rodadura [Larrodé]..	15
Figura 4. Esquema de esfuerzos de resistencia por las cajas de grasa [Larrodé]	16
Figura 5. Esquema de esfuerzos en un plano inclinado	17
Figura 6. Característica mecánica motor diésel DT 466E 210 EPA 04 [INTERNATIONAL]	18
Figura 7. Curva par motor-velocidad y potencia – velocidad del Nissan Leaf y Nissan de gasolina 1.6l [Movilidad]	19
Figura 8. Curva característica de un motor de inducción [Máquinas]	19
Figura 9. Tipos de tracción en vehículos ferroviarios.	21
Figura 10. Frotador en contacto con tercer raíl [Ferropedia]	22
Figura 11. Eje motorizado de un automotor Bombardier Talent en Ostrava (República Checa) [Ferropedia]	23
Figura 12. Distribución acumulada de las rampas características en la red ferroviaria española [elaboración propia].....	25
Figura 13. Viento medio anual en España a 30 m [Idae].....	29
Figura 14. Captura de la hoja de cálculo	33
Figura 15. Resistencias al movimiento: escenario 1 – 4 ejes	34
Figura 16. Resistencias al movimiento: Escenario 1 – 2 ejes	34
Figura 17. Resistencias al movimiento: Escenario 2 – 4 ejes	35
Figura 18. Resistencias al movimiento: Escenario 2 – 2 ejes	35
Figura 19. Resistencias al movimiento: Escenario 3 – 4 ejes	36
Figura 20. Resistencias al movimiento: Escenario 3 – 2 ejes	36
Figura 21. Resistencias al movimiento: Escenario 4 – 4 ejes	37
Figura 22. Resistencias al movimiento: Escenario 4 – 2 ejes	37
Figura 23. Pasos de cálculo.....	39
Figura 24. Curva par – velocidad de giro del ISM11 Euro IV/ Euro V	40
Figura 25. Relación de marchas: ISM11 Euro IV/Euro V.....	40
Figura 26. Relación de marchas, simplificación de caja de cambios	41
Figura 27. Relación de marchas, mejora rendimiento	42
Figura 28. Parámetros de entrada: escenario 1 – 4 ejes.....	43

Figura 29. Caso 1.4: Curvas características diésel	43
Figura 30. Parámetros de entrada: Escenario 1 – 2 ejes	44
Figura 31. Caso 1.2: Curvas características diésel	45
Figura 32. Caso 1.2: Curvas características eléctrica	46
Figura 33. Parámetros de entrada: Escenario 2 – 4 ejes	47
Figura 34. Caso 2.4: Curvas características diésel	47
Figura 35. Caso 2.4: Curvas características eléctrica	48
Figura 36. Parámetros de entrada: Escenario 2 – 2 ejes	49
Figura 37. Caso 2.2: Curvas características diésel	49
Figura 38. Caso 2.2: Curvas características eléctrica	50
Figura 39. Parámetros de entrada: Escenario 3 – 4 ejes	51
Figura 40. Caso 3.4: Curvas características diésel	51
Figura 41. Caso 3.4: Curvas características eléctrica	52
Figura 42. Parámetros de entrada: Escenario 3 – 2 ejes	53
Figura 43. Caso 3.2: Curvas características diésel	53
Figura 44. Caso 3.2: Curvas características eléctrica	54
Figura 45. Parámetros de entrada: Escenario 4 – 4 ejes	55
Figura 46. Caso 4.4: Curvas características diésel	55
Figura 47. Caso 4.4: Curvas características eléctrica	56
Figura 48. Parámetros de entrada: Escenario 4 – 2 ejes	57
Figura 49. Caso 4.2: Curvas características diésel	57
Figura 50. Caso 4.2: Curvas características eléctrica	58

Lista de tablas

Tabla 1. Valores característicos de las variables [Elaboración propia]	26
Tabla 2. Valores de los parámetros para escenario 1	26
Tabla 3. Valores de los parámetros para escenario 2	27
Tabla 4. Valores de los parámetros para escenario 3	27
Tabla 5. Valores de los parámetros para escenario 4	27
Tabla 6. Valores de rugosidad superficial para los distintos tipos de superficie [Idae] .	30
Tabla 7. Valores orientativos de coeficiente aerodinámico (Cx) para varios vehículos [Suárez]	31
Tabla 8. Características de los motores diésel	32
Tabla 9. Características de los motores eléctricos	32
Tabla 10. Resistencia máxima por escenario	38
Tabla 11. Relación de marchas inicial.....	41
Tabla 12. Relación de marchas simplificada.....	41
Tabla 13. Relación de marchas, mejora de rendimiento	42
Tabla 14. Caso 1.4: relación de marchas diésel.....	44
Tabla 15. Caso 1.2: relación de marchas diésel.....	46
Tabla 16. Caso 1.2: relación de reducción tracción eléctrica	46
Tabla 17. Caso 2.4: relación de marchas diésel.....	48
Tabla 18. Caso 2.4: relación de reducción tracción eléctrica	48
Tabla 19. Caso 2.2: relación de marchas diésel.....	50
Tabla 20. Caso 2.2: relación de reducción tracción eléctrica	50
Tabla 21. Caso 3.4: relación de marchas diésel.....	52
Tabla 22. Caso 3.4: relación de reducción tracción eléctrica	52
Tabla 23. Caso 3.2: relación de marchas diésel.....	54
Tabla 24. Caso 3.2: relación de reducción tracción eléctrica	54
Tabla 25. Caso 4.4: relación de marchas diésel.....	56
Tabla 26. Caso 4.2: relación de reducción tracción eléctrica	56
Tabla 27. Caso 4.2: relación de marchas diésel.....	58
Tabla 28. Caso 4.2: relación de reducción tracción eléctrica	58
Tabla 29. Motorización por escenario, diseño final	59

Glosario

a	Aceleración $\left[\frac{cm}{s^2}\right]$
a_t	Coefficiente de rugosidad del terreno [m]
b	Empate [m]
C_x	Coefficiente de penetración aerodinámica, adimensional
E_m	Esfuerzo tractor entregado por el motor[kp]
h	Altura objetivo [m]
h_0	Altura de referencia [m]
i	Pendiente de la rampa [‰]
i'	Relación de reducción, adimensional
M	Par motor [Nm]
r	Radio del alojamiento de las cajas de grasa [m]
R	Radio de las ruedas [m]
R_{aer}	Resistencia aerodinámica [N]
R_c	Radio de curva [m]
R_{cg}	Resistencia por las cajas de grasa $\left[\frac{kp}{t}\right]$
R_{curva}	Resistencia por curvas $\left[\frac{kp}{t}\right]$
R_{cte}	Resistencia específica a velocidad constante $\left[\frac{kp}{t}\right]$
$R_{inercia}$	Resistencia específica de inercia $\left[\frac{kp}{t}\right]$
R_{rampa}	Resistencia específica por rampas $\left[\frac{kp}{t}\right]$
R_{rod}	Resistencia específica de rodadura $\left[\frac{kp}{t}\right]$
$S_{frontal}$	Superficie frontal del vehículo [m^2]
v_{aire}	Velocidad del aire $\left[\frac{km}{h}\right]$
v_{lineal}	Velocidad lineal al régimen de giro $\left[\frac{km}{h}\right]$

v_{tren}	Velocidad del tren $\left[\frac{km}{h}\right]$
δ	Penetración de la rueda en el carril $[m]$
ψ	Coefficiente de rozamiento de caja de grasa, adimensional
ρ_{aire}	Densidad del aire $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
ω	Régimen de giro [rpm]

1. Introducción

1.1 Objeto y justificación

El objeto de este proyecto es diseñar y analizar las prestaciones necesarias de un vagón ferroviario de mercancías autopropulsado. Se pretende realizar un análisis comparativo entre varios escenarios atendiendo a las prestaciones.

El proyecto puede ser relevante por la existencia de trazados complicados donde composiciones largas no pueden acceder. Mediante vagones individuales puede resolverse este problema, mejorando la operativa del transporte de mercancías en estas regiones. Por otro lado, la reducción del tamaño de las composiciones, que conlleva motores de menor potencia y tamaño, podría revelar una mejora en la eficiencia energética. Con las composiciones actuales, las locomotoras llevan motores muy grandes (hasta 8000 CV), pudiendo estar infrautilizados. Lo que se pretende con composiciones de menor tamaño es ajustar la potencia ofrecida por los motores a la potencia requerida y de mejorar el consumo energético neto por tonelada transportada.

1.2 Alcance

El alcance del proyecto contempla el estudio del estado de la técnica para establecer un punto de partida. Se realiza un análisis de las resistencias al movimiento del vagón y se plantean diferentes escenarios para poder determinar las prestaciones necesarias y su idoneidad en cada situación. Una vez obtenidos los resultados y comparados los escenarios, se determina el diseño final y se proponen las líneas futuras.

En el Capítulo 1 – “Introducción” se establecen las bases del proyecto, definiendo el objeto y alcance, la justificación del mismo y los objetivos que se pretenden lograr.

En el Capítulo 2 – “Estado de la técnica” se revisan las características del transporte por ferrocarril y casos de vehículos similares.

En el Capítulo 3 – “Características del movimiento del ferrocarril” se estudia la dinámica del ferrocarril y las ecuaciones involucradas.

En el Capítulo 4 – “Alternativas de tracción” se analizan las opciones más habituales en la tracción de vehículos ferroviarios.

En el Capítulo 5 – “Hipótesis de cálculo” se analizan las variables que tienen más influencia en el cálculo de las prestaciones y se plantean los escenarios de cálculo.

En el Capítulo 6 – “Cálculo de características técnicas y prestaciones por escenario” se han definido los valores de los parámetros para los cálculos y se han calculado las resistencias al movimiento de cada escenario.

En el Capítulo 7 – “Análisis y optimización” se explica el procedimiento de cálculo seguido para obtener las curvas de esfuerzo de los motores y se seleccionan los más idóneos para cada caso de estudio.

En el Capítulo 8 – “Obtención de resultados y determinación de diseño final” se han resumido los resultados de los análisis previos y se ha propuesto una matriz de soluciones.

En el Capítulo 9 – “Conclusiones” se desarrollan las principales conclusiones extraídas durante la realización del proyecto y se comprueba la consecución de los objetivos.

En el Capítulo 10 – “Líneas futuras” se plantean posibles líneas de trabajo que para complementar el estudio y obtener un producto.

En los anexos se añade información adicional sobre varios aspectos complementarios al estudio.

1.3 Objetivos

Este Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo principal establecer las bases para el diseño de las prestaciones de un vagón ferroviario de mercancías autopropulsado. En la conclusión del trabajo se pretenden alcanzar los siguientes objetivos:

- Revisar la situación de la técnica para el transporte de mercancías y la autopropulsión en ferrocarriles.
- Definir unos escenarios de referencia que sirvan para dimensionar las prestaciones del vehículo.
- Proponer diseños de prestaciones del vehículo atendiendo a los casos de estudio.

2. Estado del arte / de la técnica

El ferrocarril es un sistema de transporte de mercancías y personas guiado sobre una vía férrea. Se trata de un sistema que incorpora algunas ventajas respecto al transporte por carretera, lo que hace que su uso sea relevante. Las principales ventajas que se pueden enumerar son:

- La rodadura acero-acero tiene un coeficiente de rozamiento muy reducido, el valor estándar que suele tomarse es de 0,003. Un coeficiente tan bajo conlleva unas resistencias al movimiento un orden de magnitud menores que en el transporte por carretera y, además, permiten lograr consumos energéticos inferiores [Larrodé].
- Se puede considerar como el medio de transporte más respetuoso con el medioambiente. El ferrocarril es el medio con menos emisiones por tonelada transportada gracias a la eficiencia energética que le caracteriza, como puede verse en la figura 1. La existencia de líneas electrificadas también lo convierten en un medio con un alto nivel de adaptación a las energías renovables, ya que no necesita tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica. Por último, la vida útil de los vehículos ferroviarios es más longeva que en los vehículos de transporte por carretera, lo que también le favorece, puesto que el impacto ocasionado por la fabricación de una unidad se reparte más en el tiempo. Los contratos de adquisición de vehículos ferroviarios incluyen las revisiones periódicas por un periodo entre 30 y 40 años. Los camiones, por otro lado, tienen una vida útil estimada en 10 años [Larrodé][OTLE].

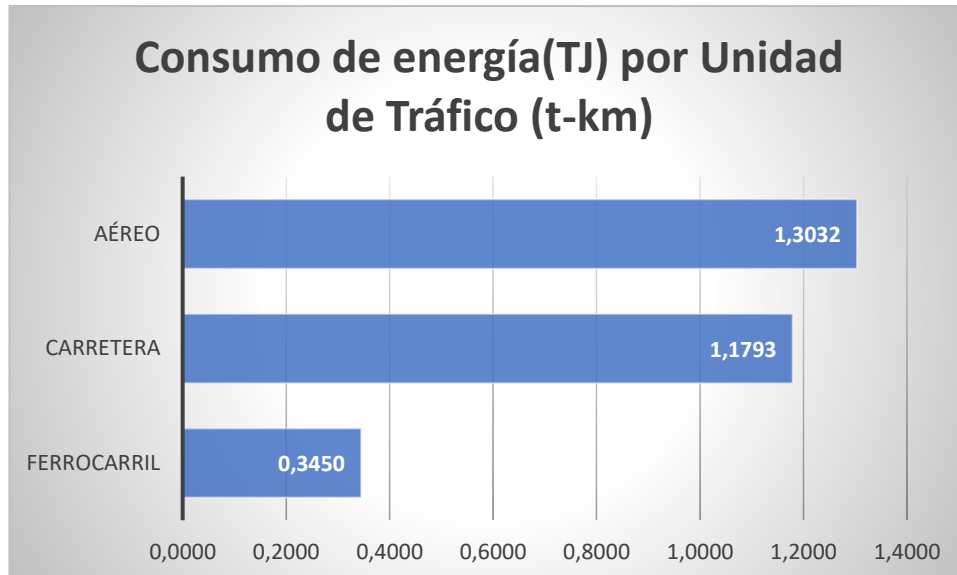


Figura 1. Consumo de energía por Unidad de Tráfico para cada medio de transporte en 2016 [OTLE]

- El ferrocarril es un medio de transporte masivo, permite mover una gran cantidad de mercancías al mismo tiempo, pudiendo sustituir a una gran número de camiones en largos tramos, descongestionando las carreteras. En países como Estados Unidos y Australia donde las distancias son mayores y la orografía es eminentemente llana, existen composiciones de varios km de longitud. Es fácil encontrar composiciones de 2,5 km de longitud, con 120 vagones. En España, la longitud de los trenes está limitada a 400 m, debido a la falta de apartaderos con

espacio para trenes de mayor longitud. En Europa, el tamaño permitido aumenta hasta 750 m [Larroché][ADIF].

- Al ser un transporte guiado, sólo hay un grado de libertad que controle el movimiento, lo que facilita el control y los sistemas de automatización de la conducción de los vehículos ferroviarios. Prueba de ellos son los sistemas de seguridad ERTMS o algunos metros, en los que el conductor se encarga de supervisar el sistema o se llega a carecer de conductor.
- Para el mantenimiento de la infraestructura y superestructura ferroviaria se utilizan vehículos autopropulsados de diferentes tipologías. Hay vehículos pesados, como los que se utilizan para el mantenimiento del balasto, como se muestra en la figura 2. También existen otros más ligeros, como los que se emplean en el tratamiento de cabeza de carril. Estos se encargan del amolado y perfilado de los carriles, lo cual se hace necesario con la aparición de líneas de ferrocarril en las que se superan los 160 km/h [Plasser].



Figura 2. Vehículo pesado para el mantenimiento del balasto, con tolva de 15m³[Plasser].

- Existen otros vehículos ferroviarios autopropulsados en desarrollo pensados para mejorar los costes logísticos en el movimiento de contenedores en los procesos de carga y descarga. Estos vehículos equipan pequeños motores diésel que les permiten moverse independientes de su composición, por medio de control remoto [SPR].
- En los trenes dedicados al transporte de viajeros aparecieron las Unidades Múltiples Diésel (UMD). Las composiciones no necesitan de una locomotora, ya que cada unidad se ve impulsada por uno o varios motores diésel, que suelen estar incorporados en la base del vehículo. Las UMD otorgan una mayor flexibilidad para adecuarse a la demanda de pasajeros, pues se pueden hacer composiciones de longitud variables sin que la capacidad de tracción se vea afectada, pues cada vagón es capaz de impulsarse a sí mismo. También permiten que, aun con la existencia de fallos en algunos vagones, el tren pueda continuar circulando gracias a la potencia sobrante del resto del tren [Larroché].

3. Características que definen el movimiento del ferrocarril

El movimiento del ferrocarril está definido por una dinámica en la que hay que tener en cuenta tres factores: la resistencia al movimiento, la potencia y la adherencia. Las resistencias son fuerzas que se oponen al movimiento, mientras el factor de la potencia es el que va a favorecer la impulsión del vehículo. Para que un vehículo pueda desplazarse, las fuerzas tractoras deben ser superiores a las fuerzas resistentes. Sin embargo, no es la única condición que debe darse para que el movimiento suceda. Para que las fuerzas de tracción puedan ser transmitidas a las ruedas, se deben cumplir las condiciones de adherencia, ya que, si no se cumplen las ruedas patinan y el esfuerzo no es efectivo. Para caracterizar con precisión el movimiento de los vehículos ferroviarios se pueden definir tres curvas asociadas a los factores citados previamente. Mediante estas curvas se conoce la dinámica del vehículo en el rango de situaciones estudiadas [Larrodé].

3.1 Curvas de resistencia

A continuación, se van a definir las principales resistencias que se encuentran al movimiento de un vehículo ferroviario. A efectos prácticos, no se han considerado las resistencias por los esfuerzos de gancho y de remolque, ya que, en el presente estudio, referente a vehículos autopropulsados, estos no se unen para formar composiciones.

3.1.1 Resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura se debe a la reacción del carril sobre la rueda, debida a la deformación del metal. Esta deformación es la que dificulta el avance. En la figura 3 se muestra un diagrama con las fuerzas y las dimensiones involucradas.

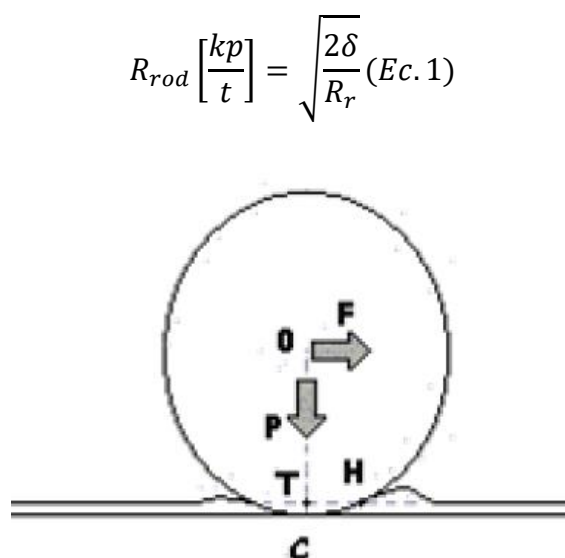


Figura 3. Diagrama de fuerzas involucradas en la resistencia de rodadura [Larrodé]

3.1.2 Resistencia debida a cajas de grasa

La resistencia de las cajas de grasa hace referencia al rozamiento que aparece entre el eje y el cojinete del alojamiento del éste. Este coeficiente se intenta reducir al mínimo, pero está limitado por los valores de tensión que debe soportar el eje. En la figura 4 se muestra un esquema de los esfuerzos implicados.

$$R_{cg} \left[\frac{kp}{t} \right] = \Psi \cdot \frac{r}{R_r} \quad (Ec. 2)$$

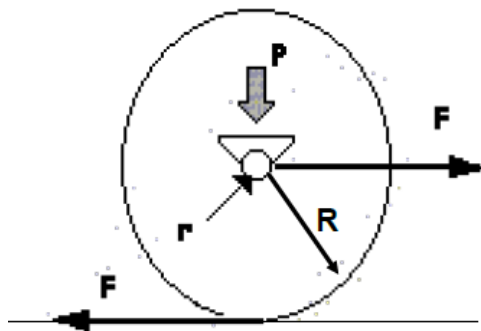


Figura 4. Esquema de esfuerzos de resistencia por las cajas de grasa [Larrodé]

3.1.3 Resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica es un término variable con una dependencia cuadrática con la velocidad. Este término adquiere gran importancia a partir de 40 km/h. La mayor parte de la energía de tracción se emplea en vencer esta resistencia.

$$R_{aer} [N] = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot S_{frontal} \cdot C_x \cdot (v_{tren} + v_{aire})^2 \quad (Ec. 3)$$

3.1.4 Resistencia debida a curvas

Cuando aparecen curvas, la resistencia al movimiento aumenta. Esta resistencia tiene varios orígenes, pero dado el problema a estudiar, quedan reducidos a dos, en los que toman partida el radio de la curva y el empate (distancia entre ejes). Al estar las ruedas montadas fijas sobre el eje, cuando el vehículo circula por un tramo curvo, existe un deslizamiento longitudinal distinto entre las ruedas del carril exterior e interior. Por otro lado, los ejes son contantemente paralelos debido a que el bastidor es rígido, lo que provoca deslizamiento transversal.

$$R_{curva} \left[\frac{kp}{t} \right] = \frac{800}{R_c} + \frac{4b + b^2}{R_c - 45} \quad (Ec. 4)$$

3.1.5 Resistencia debida a las rampas

En las rampas aparece una resistencia debido a la acción de la fuerza gravitatoria. Los ferrocarriles tienen una gran masa. Si se considera este hecho junto con la baja resistencia al movimiento en llano, resulta que una pendiente, por mínima que sea, hace que el crecimiento de la resistencia sea de gran magnitud relativa. En la figura 5 se muestra un diagrama de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo en un plano inclinado.

$$R_{rampa} \left[\frac{kp}{t} \right] = i \quad (Ec. 5)$$

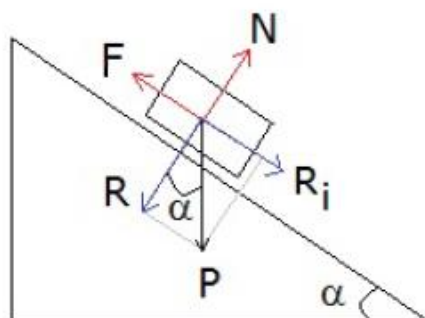


Figura 5. Esquema de esfuerzos en un plano inclinado

3.1.6 Resistencias totales a velocidad constante

A velocidad constante las resistencias que aparecen son las de rodadura, rozamiento y aerodinámica, con la posibilidad de incluir también la resistencia de curva y de rampa cuando sea necesario.

$$R_t = R_{aer} + R_{cg} + R_{rod} + R_{rampa} + R_{curva} \quad (Ec. 6)$$

3.1.7 Resistencias de inercia

Además de las resistencias a velocidad constante, hay que tener en cuenta las resistencias de inercia, que aparecen en los cambios de velocidad, por el mero hecho de poseer el vehículo una masa y estar sometido a una aceleración. La resistencia específica de inercia resulta igual a la aceleración del vehículo.

$$R_{inercia} \left[\frac{kp}{t} \right] = a \quad (Ec. 7)$$

3.1.8 Resistencia al arranque

La resistencia al arranque aparece tras largos tiempos de parada que pueden sufrir los trenes. La capa lubricante de las cajas de grasa desaparece con el tiempo y cuando llega el momento de iniciar el movimiento, la ausencia del lubricante hace que el primer giro del eje encuentre una resistencia más elevada que la habitual. Para iniciar el movimiento de un vehículo ferroviario es habitual que el esfuerzo necesario sea superior a 10 kp/t, cuando en régimen de marcha el esfuerzo es de 2 kp/t [Larrodé]. En el caso de estudio se ha considerado la resistencia de arranque con un valor de 6 kp/t ya que no hay esfuerzos de gancho derivados del remolque de otros vehículos.

$$R_{arranque} \left[\frac{kp}{t} \right] = 6 \quad (Ec. 8)$$

3.2 Curvas de potencia

Las curvas de potencia vienen determinadas por las características mecánicas de los motores. Se pueden distinguir tres tipos fundamentales de motores: diésel, eléctricos de corriente continua y eléctricos de corriente alterna.

En la figura 6 se muestra un ejemplo de la curva par-potencia/velocidad de un motor diésel. Las curvas de par se caracterizan por formar una joroba ascendente y mantener una capacidad de par estable en un rango amplio de velocidades. La potencia muestra una tendencia creciente hasta el que se podría considerar el punto de operación. Los vehículos que equipan motores diésel se ayudan de la transmisión para variar el par ofrecido, de manera que pueda adaptarse a las condiciones del movimiento. Una de las principales diferencias en el comportamiento de los motores diésel respecto a los eléctricos es la ausencia de par a bajas revoluciones, otra razón por la que se hace necesaria la presencia de la transmisión. Los motores eléctricos presentan un par elevado a bajas revoluciones, lo que permite mayores esfuerzos en el arranque.

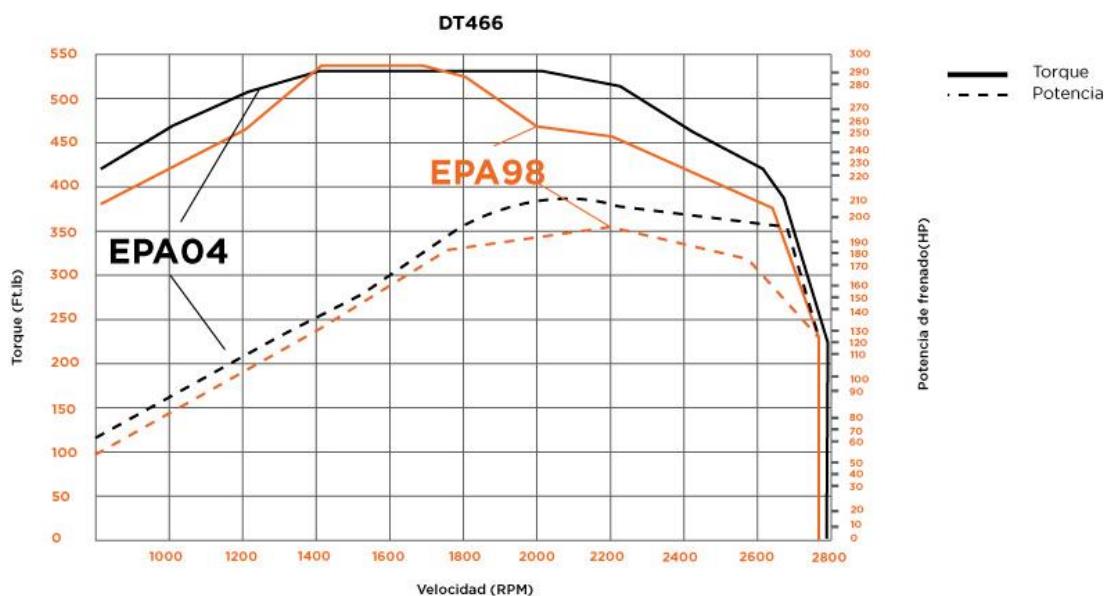


Figura 6. Característica mecánica motor diésel DT 466E 210 EPA 04 [INTERNATIONAL]

A continuación, se muestra la figura 7, que contiene la curva característica de un motor eléctrico de corriente continua. Los motores de corriente continua se empleaban en los inicios de la tracción ferroviaria eléctrica debido a su sencillez de control, pero el rendimiento ofrecido por estos motores no era demasiado elevado, produciendo pérdidas en catenarias y en motores, por lo que con el tiempo se fueron sustituyendo por los motores de corriente alterna. Los motores de corriente continua ofrecen su par máximo desde el arranque, al mismo tiempo que va aumentando la potencia. Cuando el motor alcanza su potencia máxima, el par que puede ofrecer comienza a disminuir [Movilidad].

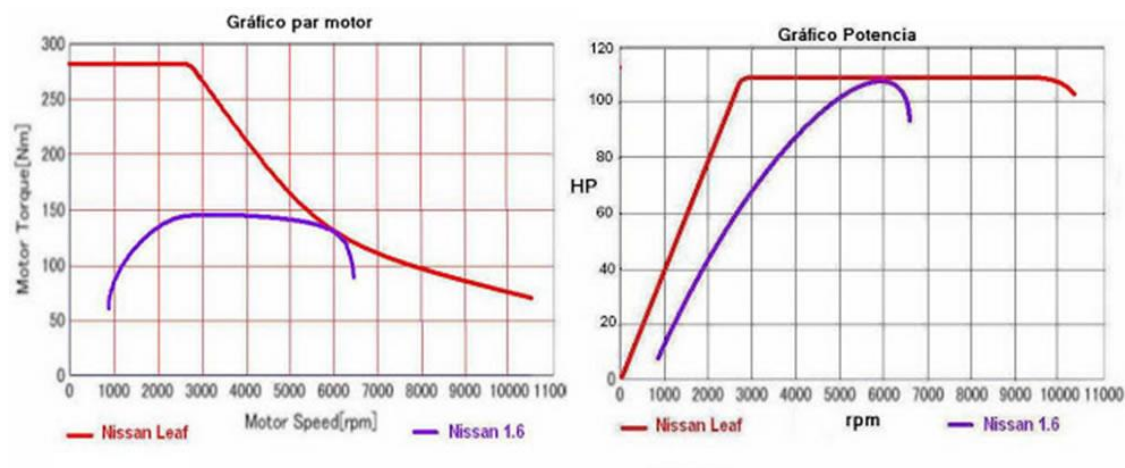


Figura 7. Curva par motor-velocidad y potencia – velocidad del Nissan Leaf y Nissan de gasolina 1.6l [Movilidad]

Por último, en la figura 8 aparece la curva característica de un motor eléctrico de corriente alterna. El desarrollo de la electrónica de potencia propició la aparición de estos motores como alternativa a los de corriente continua. Los motores de corriente alterna pueden ofrecer las mismas prestaciones de par y potencia con un tamaño más reducido, además de tener un rendimiento notablemente superior. El mantenimiento de este tipo de motores también es más económico que el de los de corriente continua.

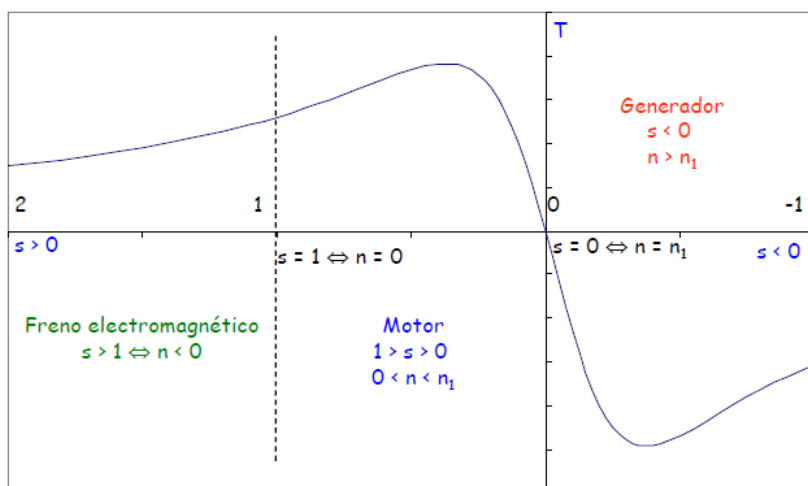


Figura 8. Curva característica de un motor de inducción [Máquinas]

3.3 Curvas de adherencia

La curva de adherencia es la que va a limitar la potencia que puede transmitir el motor a los carriles para avanzar. En condiciones de adherencia, no existe deslizamiento entre rueda y carril, lo que permite el movimiento del vehículo. En la adherencia de los ferrocarriles intervienen dos fenómenos: el engrane entre dos cuerpos (nivel microscópico) y las atracciones microatómicas de las dos masas metálicas. Dada la naturaleza de la adherencia, esta será mayor cuanto mayor sea el peso de la rueda sobre el carril (peso adherente). Para que se den los dos fenómenos anteriormente citados, la condición que se debe cumplir es que el esfuerzo de tracción sea menor que una parte del peso adherente. La relación entre el esfuerzo y el peso adherente se denomina coeficiente de adherencia (Ec.9). Cuando se supera el límite marcado por el coeficiente

de adherencia se dice que se ha roto la adherencia y la rueda comienza a deslizar. Al existir movimiento relativo entre rueda y carril en el punto de contacto, las reacciones son menores y por tanto es necesario reducir el esfuerzo tractor para recuperar la adherencia.

$$\varphi_{ad} = \frac{E_{max}}{P} (Ec. 9)$$

Además, hay que tener en cuenta que el coeficiente de adherencia varía con la velocidad. La función de evolución del coeficiente de adherencia puede variar según la fuente. En el trabajo se ha tomado como referencia la función dada por la norma técnica de Renfe [NT Renfe].

$$\varphi_{ad} = \varphi_0 \left(0,2115 + \frac{33}{v_{tren} + 42} \right) (Ec. 10)$$

4. Alternativas de tracción

En el ferrocarril existen alternativas a la hora de obtener la energía para la tracción. Las más habituales son la tracción diésel y la tracción eléctrica, con sus ventajas e inconvenientes. Además, existen opciones híbridas que permiten aprovechar los puntos fuertes de ambas opciones. En la figura 9 se ha expuesto un esquema con la clasificación de los sistemas de tracción.

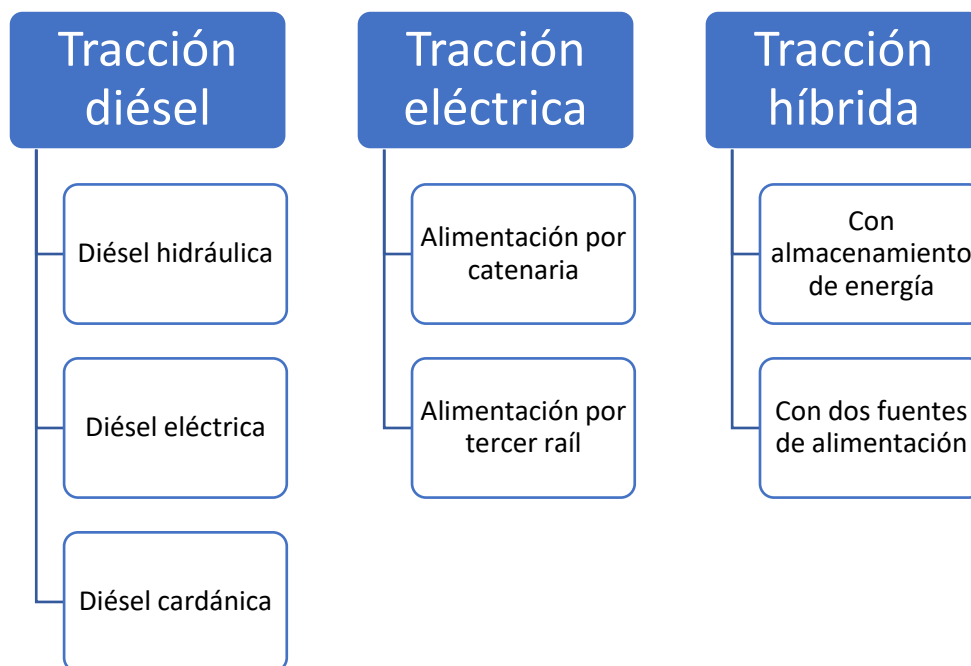


Figura 9. Tipos de tracción en vehículos ferroviarios.

4.1 Tracción diésel

La tracción diésel en los trenes presenta tres variantes fundamentales. En la tracción diésel-cardánica o diésel-mecánica la energía que produce el motor se transmite por medio de engranajes y un eje de transmisión hacia las ruedas del vehículo. Las elevadas potencias que deben gestionar las cajas de cambios en este tipo de tracción complican su utilización en trenes pesados, por lo que este sistema es utilizado en locomotoras dedicadas a las maniobras en estaciones o en automotores, ya que permiten una tracción distribuida.

En el caso de la tracción diésel eléctrica, la energía del motor se emplea en producir energía eléctrica por medio de un generador eléctrico que, a su vez, alimenta a uno o varios motores eléctricos de tracción. El mantenimiento de los equipos en este sistema es más sencillo que en la tracción diésel-mecánica. Este modo de tracción es habitual en los automotores, en los que en ocasiones se combinan vehículos remolcados y propulsados. La tracción diésel-eléctrica permite que el motor diésel opere en su punto de máximo rendimiento a cualquier velocidad, ya que la regulación se realiza sobre el motor de tracción.

La tercera alternativa de la tracción diésel se denomina tracción diésel-hidráulica. En ella, el par motor se transmite a las ruedas mediante uno o varios convertidores de par hidráulicos. Con esta alternativa se produce una mezcla de transmisiones hidráulicas y mecánicas que permiten al vehículo alcanzar mayor velocidad y una generación menor de ruidos.

4.2 Tracción eléctrica

En los vehículos de tracción eléctrica la fuente de energía eléctrica es externa. La energía puede tomarse de la catenaria o del tercer raíl. Se denomina tercer raíl o carril a la existencia de un conductor en forma de perfil de acero que transcurre paralelo a las vías. El vehículo capta la energía mediante una zapata denominada frotador, que permite cerrar el circuito eléctrico, como puede observarse en la figura 10. El tercer raíl fue el primer sistema empleado en la electrificación ferroviaria, pero en la actualidad su uso ha quedado reducido a los transportes urbanos, como son el tranvía y el metro. Existen varios tipos de tercer raíl, atendiendo al grado de aislamiento que se necesite. El tercer carril solo permite la transmisión de corriente continua, generalmente con bajos niveles de tensión, entre 500 V y 800 V. La transmisión por corriente continua provoca elevadas pérdidas con la distancia, lo que obliga a la construcción de numerosas subestaciones a lo largo del recorrido con el objetivo de reducirlas. Una ventaja significativa del tercer raíl es su durabilidad. Al no estar sometido a esfuerzos de manera continua como la catenaria, soporta el paso del tiempo sin deformaciones ni desgastes pronunciados, reduciendo y abaratando su mantenimiento respecto a la catenaria.

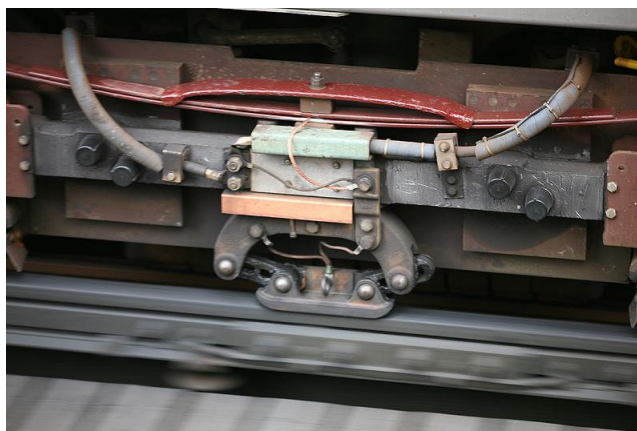


Figura 10. Frotador en contacto con tercer raíl [Ferropedia]

La catenaria es otro sistema de captación de energía eléctrica utilizado en el ferrocarril. Se denomina catenaria al tendido eléctrico aéreo paralelo al recorrido de las vías, de las que se obtiene la energía eléctrica por medio de otro componente que roza, el pantógrafo. La catenaria puede ser alimentada tanto en corriente continua como en corriente alterna y habitualmente, a una tensión más elevada que la empleada por el tercer carril.

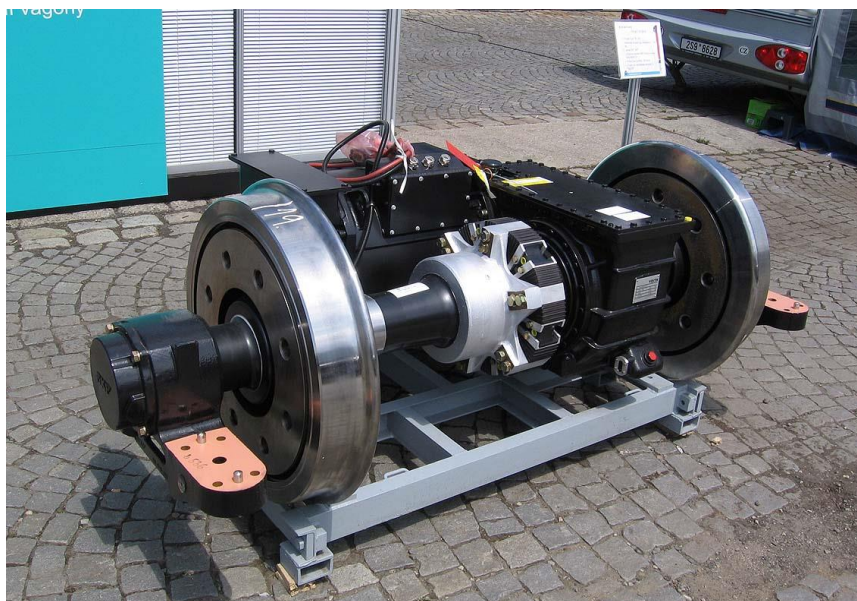


Figura 11. Eje motorizado de un automotor Bombardier Talent en Ostrava (República Checa) [Ferropedia]

Un punto positivo de la tracción eléctrica es su mayor eficiencia energética respecto a la tracción diésel y su menor nivel de ruidos. Además, los vehículos de tracción eléctrica presentan unas prestaciones superiores cuando existen rampas pronunciadas. Sin embargo, no hay que despreciar las emisiones por la ausencia de motor diésel, estas dependen del mix energético, que está compuesto en medida variable de energías fósiles y renovables. Por otro lado, los vehículos de tracción eléctrica precisan un mantenimiento más reducido y pueden hacer más kilómetros sin necesidad de revisión. Los motores eléctricos también tienen una duración mayor a la de los motores diésel. El punto negativo de la tracción eléctrica respecto la tracción diésel es el alto precio de su instalación, ya que la electrificación de una vía supone una inversión próxima a 1.000.000 €/km [Ferropedia].

4.3 Tracción híbrida

Se habla de tracción híbrida en ferrocarriles cuando el vehículo puede circular tanto por tramos electrificados como tramos no electrificados de vía. Para lograr esto, el vehículo puede contar con sistemas de almacenamiento de energía eléctrica o tener dos fuentes de alimentación. En ambos casos los motores de tracción son eléctricos.

Los sistemas de almacenamiento con los que se equipan los vehículos son baterías y supercondensadores. Las baterías permiten almacenar mayores cantidades de energía, mientras los condensadores aportan potencias más elevadas a la tracción.

Los trenes que se adaptan a dos fuentes de alimentación de energía montan grupos electrógenos diésel para alimentar a los motores eléctricos de tracción en los tramos de vía que carecen de catenaria. Estos vehículos aportan una mayor flexibilidad al servicio que ofrecen las compañías ferroviarias, ya que están preparados para la circulación por cualquier vía [AEC].

5. Hipótesis de cálculo

En este capítulo se definen el entorno de cálculo, es decir, se establecen los elementos que es necesario conocer para poder realizar los cálculos. Por otro lado, atendiendo a las circunstancias del trazado, características del vehículo y dimensiones, se proponen unos escenarios.

5.1 Definición de escenarios

A la hora de definir los escenarios que se van a estudiar, se han seleccionado los factores que resultan más influyentes a la hora de determinar las prestaciones que necesita un ferrocarril. Entre estos factores se encuentran: pendiente, velocidad, carga y distancia entre terminales.

- **Pendiente:** La pendiente de la vía es un factor con un impacto elevado en las prestaciones de un vehículo ferroviario. En las pendientes, el equilibrio entre adherencia y potencia necesaria para mover la carga entran en juego, pues la resistencia se ve incrementada de manera lineal.
- **Velocidad:** La velocidad a la que se recorren los tramos influye en la potencia que necesita desarrollar el sistema de tracción. Además, dada la relación cuadrática de la velocidad y la resistencia aerodinámica, el incremento de velocidad tiene un fuerte impacto en el aumento del consumo de energía.
- **Carga:** La carga transportada va a influir directamente sobre el par y la potencia necesarios para iniciar el movimiento y variar la velocidad y, en consecuencia, también repercute en el consumo de energía. Transportar una carga pesada también supone una restricción a la velocidad máxima, por la potencia y las distancias de frenado que se requieren. Si se combinan una carga pesada y una pendiente elevada, la velocidad de circulación debe ser reducida.
- **Distancia entre terminales:** La longitud máxima entre terminales es un factor que se debe tener en cuenta a la hora de dimensionar el sistema de aprovisionamiento energético del vehículo. En los trenes diésel hay que tener en consideración la capacidad del depósito, que debe ser capaz de albergar más volumen de combustible del que se puede consumir en ese tramo. En los trenes con tracción híbrida que equipan baterías supone también una limitación importante debido al tamaño y peso que pueden alcanzar las baterías. En el caso de los trenes eléctricos con catenaria, no se trata de un factor que afecte al diseño.

Para establecer los valores entre los que se van a variar los factores, se parte de la información que facilita ADIF sobre la red ferroviaria española. A continuación, se detallan los valores que van a usarse para definir los escenarios y se presenta el resumen en la tabla 1.

- **Pendiente [%]:** En el mapa 4 se muestran las rampas características de los tramos entre terminales de la red ferroviaria española. La rampa característica de un tramo es la pendiente máxima que el tren debe superar, supone la mayor limitación para los vehículos y en base a este factor se seleccionan las locomotoras de los convoyes. En la figura 12 se muestra la distribución

acumulada de las pendientes características. El valor máximo de la red es de 45‰ (Ripoll – La Tour de Carol) y el segundo más alto es de 34‰ (Alhondiguilla – Mirabueno), pero se trata de valores marginales, pues entre los dos casos sólo se dan en tres ocasiones y en tramos cortos. Con una pendiente de 24‰ se cubre el percentil 95, por lo que se va a tomar como referencia para pendientes elevadas. Siguiendo la misma metodología se descarta una rampa de 0‰ como tramo llano. En su lugar, se toma de referencia el valor de 3‰, con el que se cumple el percentil 5. Tras estudiar los valores del mapa, el valor medio de rampa característica es de 14‰ y el valor más repetido de 17‰. Con la intención de abarcar una mayor cantidad de situaciones, se va a tomar el valor de 17‰ como referente para una pendiente media, ya que con la diferencia de 3‰ se cubren un 20% más de situaciones (del 48,7% al 69,9%) [Adif].

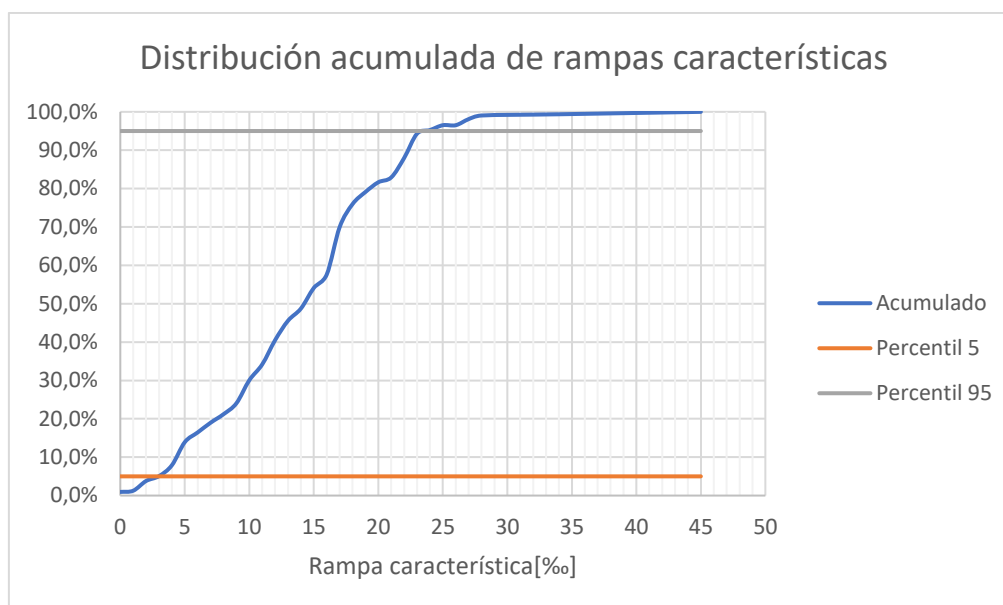


Figura 12. Distribución acumulada de las rampas características en la red ferroviaria española [elaboración propia]

- **Tramo[km]:** en España hay 26 puntos fijos de suministro de gasóleo y algunos puntos móviles que deben cumplir con unos requisitos técnicos, medioambientales y de seguridad para ser considerados como tales [Adif].
- **Velocidad[km/h]:** La velocidad máxima de los trenes de mercancías viene limitada por los vagones que forman el convoy, más que por la capacidad tractora de las locomotoras. En la mayoría de los casos, esta velocidad es de 100 km/h, y en casos muy concretos, asciende a 120 km/h. En los estudios se va a considerar que la velocidad máxima es de 100 km/h. [Adif]
- **Peso total[t]:** La carga remolcada depende del vagón, ya que se asigna en función del número de ejes. Para los vagones de 2 ejes la carga máxima es de 45 t, mientras para los de 4 ejes es de 90 t. El caso de una carga ligera se va a considerar el del vagón vacío, la tara del vehículo. Esta depende en gran medida de la tipología del vagón (tolva, contenedor, porta vehículos, etc). Para llegar a algunas conclusiones se ha analizado el catálogo de vagones de mercancías que dispone Renfe y se han diferenciado los vagones de 2 ejes de los de 4 ejes. La

tara media en los vagones de dos ejes es de 14,5 t y de 26,5 t en los de 4 ejes [Renfe].

Tabla 1. Valores característicos de las variables [Elaboración propia]

Variable	Pendiente máx. [‰]	Velocidad máx.[km/h]	Peso total [t]		Long. tramo [km]
			2 ejes	4 ejes	
Máximo (10)	24	100	45	90	500
Medio (5)	17	80	30	60	200
Mínimo (1)	3	60	14,5	26,5	60

5.2 Selección de escenarios

En este apartado, partiendo de las variables de referencia calculadas en la tabla 1 se han definido cuatro situaciones características de estudio, en las que un vagón autopulsado puede tener relevancia.

5.2.1 Escenario 1

El primer escenario que se plantea presenta un recorrido bastante habitual a través de la meseta española, donde el perfil es generalmente llano y las distancias entre terminales es elevada.

Tabla 2. Valores de los parámetros para escenario 1

Pendiente	Tramo	Velocidad	Peso
1	10	10	10

5.2.2 Escenario 2

El segundo escenario planteado responde a tramos de instalaciones mineras, donde las cargas son pesadas, debido a la naturaleza de las mismas. Es habitual también que estos recorridos presenten distancias pequeñas, situándose cerca de estaciones intermodales para facilitar el movimiento de la mercancía. Por último, las pendientes características a superar pueden ser elevadas, pues son instalaciones que se encuentran entre montañas. Ejemplos de este escenario pueden ser el tramo ferroviario que abastece a la central térmica de Andorra desde el puerto de Tarragona o la cuenca minera del Alto Guadiato, en Córdoba.

Tabla 3. Valores de los parámetros para escenario 2

Pendiente	Tramo	Velocidad	Peso
10	1	1	10

5.2.3 Escenario 3

Las condiciones del tercer escenario se asemejan a dos situaciones que pueden darse en el mundo real. La primera de estas situaciones es la de un tren que se dedica al movimiento de contenedores de un puerto a las instalaciones de depot, con los contenedores vacíos.

La otra situación se corresponde con el suministro por ferrocarril a una empresa de automoción. Los componentes de automoción son ligeros y las empresas auxiliares se concentran en los alrededores de la marca ensambladora, por lo que los pesos que se transportan son bajos y las distancias, cortas.

Tabla 4. Valores de los parámetros para escenario 3

Pendiente	Tramo	Velocidad	Peso
1	1	5	1

5.2.4 Escenario 4

El último escenario presenta una situación intermedia, a partir del cual se puede aproximar el comportamiento a otros escenarios en los que uno de los factores se ve incrementado y otro que afecte al rendimiento de la misma manera, se ve decrementado. Un ejemplo de esta situación puede ser un tramo donde la pendiente sea elevada. Para tener una buena aproximación de las prestaciones obtenidas en este escenario, la carga debe ser baja.

Tabla 5. Valores de los parámetros para escenario 4

Pendiente	Tramo	Velocidad	Peso
5	5	5	5

6. Cálculo de características técnicas y prestaciones por escenario

Para calcular las características técnicas y las prestaciones necesarias en cada escenario se ha hecho uso del software de Microsoft Office – Excel, en el cual se ha desarrollado una herramienta para automatizar las curvas de la dinámica del vagón en cada escenario. Se ha definido una hoja para introducir los parámetros del escenario, dos hojas para el cálculo de las resistencias y de la adherencia respectivamente y una hoja para introducir las curvas características de los motores y el cálculo de la relación de transmisión aplicada. Por último, se ha utilizado una hoja para plasmar los resultados en varias gráficas en las que se combinan las curvas de resistencia, adherencia y esfuerzo de los motores.

6.1 Parametrización de las variables

A continuación, se definen los valores que toman las variables en los cálculos.

6.1.1. Variables generales

- **Peso máximo, P** : el peso máximo según la normativa de Adif es de 22,5 t/eje, por lo tanto, el peso máximo del vehículo con la carga puede ser de 45 o 90 t, en función de la tipología de vagón.
- **Radio de ruedas, R_r** : se ha tomado un valor de $R=0,5$ m, ya que se trata de un valor típico en el ferrocarril.
- **Aceleración, a** : Se han tomado como referencia las aceleraciones de los trenes de mercancías, con valores habituales de $a = 3 \frac{cm}{s^2}$.

6.1.2 Variables de rodadura

- **Penetración de la rueda en el carril, δ** : tiene un valor de $1,8 \cdot 10^{-7}$ m en ferrocarriles [Larrodé].
- **Radio de ejes, r** : como radio de los ejes se ha tomado 0,10 m [Cerezo].
- **Coefficiente de rozamiento en las cajas de grasa, Ψ** : Se ha tomado el valor 0,008 por ser el valor más restrictivo encontrado para unos rodamientos [Thyssenkrupp].

6.1.3 Variables aerodinámicas

- **Superficie frontal, $S_{frontal}$** : Atendiendo a las dimensiones habituales de un vagón para el transporte de carga paletizada o de vehículos, $2,9$ m x 4 m = $11,6$ m² [Renfe].
- **Densidad del aire, ρ_{aire}** : $1,225$ kg/m³ en condiciones normales.
- **Velocidad del viento, v_{aire}** : Partiendo del mapa de recurso eólico en España a 30m, se ha utilizado la ecuación 11 para obtener el valor medio de velocidad del aire, que resulta $20,8$ km/h. Este valor se ha mayorado un 50% para tener en consideración posibles rachas, por lo que el valor de velocidad del viento empleado en los cálculos es de 30 km/h.

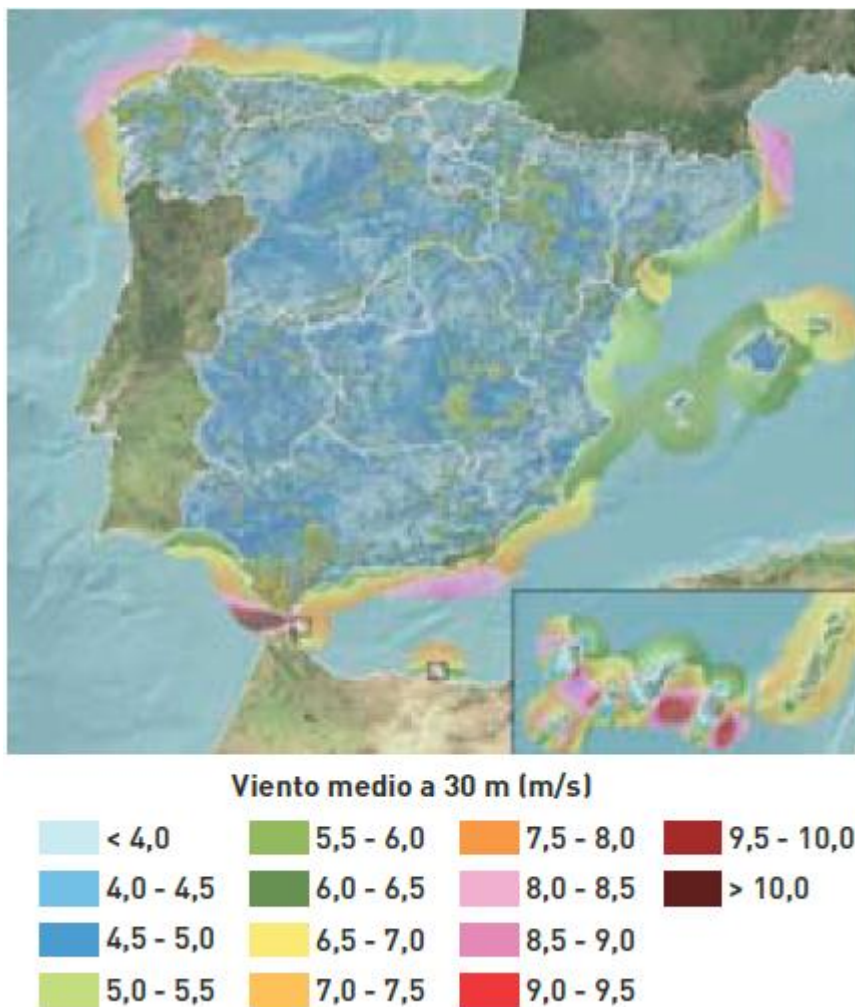


Figura 13. Viento medio anual en España a 30 m [Idae]

Prestando atención a la figura 13, se ha seleccionado como v_{h0} 6,5 m/s, ya que en la superficie se pueden apreciar algunas zonas con leve color amarillento, de esta manera se considera el caso más desfavorable. Por otro lado, la altura objetivo h es de 3 m. La selección del coeficiente de rugosidad del terreno también se ha tratado de mantener un perfil conservador en los cálculos. Los trenes habitualmente circulan por zonas abiertas, por lo que se ha supuesto la descripción de “Prados y herbazales” según la tabla 6.

Tabla 6. Valores de rugosidad superficial para los distintos tipos de superficie [Idae]

Descripción	Rugosidad (m)
Glaciares y nieves perpetuas	0,003
Cultivos	0,03
Prados y herbazales	0,05
Terrenos con arbustos	0,07
Bosques caducifolios	0,60
Bosques perennifolios y mixtos	0,75
Zonas urbanas	0,75

$$v_h = v_{h0} \left(\frac{h}{h_0} \right)^{a_t} \quad (\text{Ec. 11})$$

- **Coefficiente aerodinámico, C_x :** 0,8. En la tabla 7 se recogen unos valores de referencia para el coeficiente aerodinámico en diferentes vehículos. Se ha tomado el valor mínimo de una locomotora de vapor con t nder sin carenar. Se ha seleccionado esta tipología porque se trata de un vehículo ferroviario diseñado sin atender a criterios aerodinámicos y en el que existen multitud de espacios en los que se puede introducir el viento, al igual que en los vagones de mercancías con plataforma, porta vehículos o con tolva. Se ha optado por el valor inferior ya que la longitud total del vehículo es menor que la composición a la que hace mención el valor.

Tabla 7. Valores orientativos de coeficiente aerodinámico (C_x) para varios vehículos [Suárez]

Vehículo	C_x
Plancha cuadrada de 1 metro de lado	1
Esfera	0,1
Bicicleta con ciclista	0,9
Locomotora de vapor con tender sin carenar (long. 37 m)	0,8 – 1,05
Locomotora de vapor con tender carenada (long. 37 m)	0,35 – 0,45
Coche ferroviario de viajeros sin carena	0,40
Coche ferroviario de viajeros carenado	0,15
Tren TGV (M+8R+M) (200 m)	1,415
Tren de levitación magnética Transrapid (15 m)	0,46
Autobús	0,49
Camión con deflectores	0,70

6.1.4 Variables de adherencia

Coeficiente de adherencia en reposo, φ_0 : el coeficiente de adherencia suele ser un valor que da el fabricante y habitualmente va desde 0,2 para locomotoras con motor de corriente continua sin arenos hasta 0,4 en locomotoras con motor trifásico y control del patinaje. Se ha tomado 0,3 al ser un valor alcanzado habitualmente por los trenes de mercancías [García].

Número de ejes, n : se han considerado vagones de 2 y de 4 ejes, para cubrir un mayor espectro de usos potenciales.

6.2 Motores estudiados

Se ha planteado el cálculo de la capacidad tractora del vehículo con varios motores, con el fin de determinar el más idóneo para cada escenario. Se han tenido en cuenta motores diésel y motores eléctricos. Como se ha explicado en el capítulo 4, la diferencia entre tracción híbrida y eléctrica se basa en el origen de la energía, por lo que, a efectos prácticos un vehículo ferroviario de tracción híbrida y uno de tracción eléctrica equiparán el mismo motor. Atendiendo a las características del vehículo y del transporte por ferrocarril se han seleccionado un grupo de motores con un rango de potencias entre 200 CV y 450 CV. Los motores de estas potencias producen los esfuerzos

necesarios para impulsar al vehículo incluso en las situaciones con mayores solicitudes. Los motores eléctricos, como se ha explicado en el Capítulo 4 – Alternativas de tracción, aportan un par motor superior al de los motores diésel en igualdad de potencia, por lo que los motores eléctricos seleccionados son de una potencia más reducida. El motor eléctrico PGF22/50-C se ha tomado como referencia para los valores máximos de par y potencia. Se trata de un motor sin refrigeración que tiene limitados los usos a máxima potencia, por lo que, a efectos prácticos, en el estudio se considera un motor de la potencia indicada, pero con refrigeración.

Las curvas características de los motores se muestran en el Anexo I – Curvas características de los motores. A continuación, en las tablas 8 y 9 se muestran las características fundamentales de los motores diésel y eléctricos, respectivamente.

Tabla 8. Características de los motores diésel

Motor	ISB 6.7 EURO V	ISM11 EURO IV / EURO V	ISX15 EURO IV & V	DT 466E 195 EPA 98	DT 530 EPA 98	DT 570 EPA 04
Par máximo [Nm]	1500	2160	2240	640	1085	1085
Potencia máxima [CV]	300	460	460	195	320	305
Peso [kg]	485	940	1287	648	658	680
Velocidad [rpm]	2500	2100	2100	2400	2100	2100
Cilindrada [l]	6,7	10,8	15	7,6	8,7	9,3

Tabla 9. Características de los motores eléctricos

Motor	PGF12/30-C	PGF22/50-C (refr)
Par máximo [Nm]	309	2900
Potencia máxima [CV]	80	440
Peso [kg]	120	820
Velocidad [rpm]	1850/14000	700/3500
Intensidad [A]	305/90	292/130

6.3 Cálculos

En la figura 14 se muestra la hoja de parámetros, con los valores utilizados en el estudio de un escenario. Las celdas amarillas representan variables que se pueden modificar para adecuarse al escenario y las azules representan celdas en las que los valores se obtienen de cálculos.

Características del vehículo	
Tara[t]	26,5
Carga[t]	63,5
Peso total[t]	90
n ejes	4
Peso por eje[t]	22,5

Rodadura	
δ [m]	1,80E-07
R - radio ruedas [m]	0,5
φ	8,49E-04
resistencia $r \cdot \chi$	0,0008
Ψ	0,008
r - radio cojinetes [m]	0,1

Aerodinámica	
Superficie frontal [m ²]	11,6
Cx	0,8
ρ aire [kg/m ³]	1,225
v viento [km/h]	30

Aceleración	
a[cm/s ²]	3

Arranque	
Esfuerzo de arranque[kp/t]	6

Adherencia	
φ_{ad}	0,3

Pendiente	
i[‰]	3

Figura 14. Captura de la hoja de cálculo

6.3.1 Escenario 1

El primer caso de estudio presenta una rampa característica muy reducida, pero se desplaza a la máxima velocidad permitida por la red para vehículos de mercancías y transporta la carga máxima. En las curvas de resistencia que se muestran en las figuras 15 y 16 puede verse que la contribución de la resistencia aerodinámica es el único término que varía con la velocidad, además de la resistencia al arranque, por sus condiciones. En tramos llanos, la velocidad juega un papel importante en las resistencias totales. La resistencia a la rodadura y los rozamientos internos, por norma general, tienen una influencia muy baja en las resistencias totales. Los otros dos términos con importancia notable son las rampas y las resistencias de inercia. Esto se debe a las grandes masas que se mueven por ferrocarril en ambos casos. Además, en las rampas se ve amplificado el efecto relativo a la resistencia total ya que, como se ha mencionado, los términos de rodadura y rozamiento son muy pequeños.

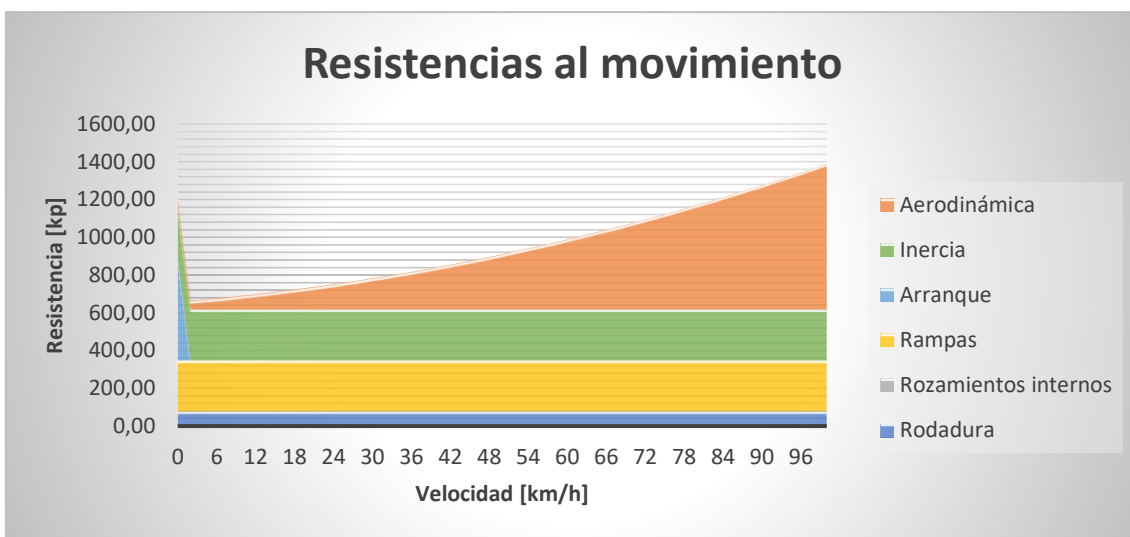


Figura 15. Resistencias al movimiento: escenario 1 – 4 ejes

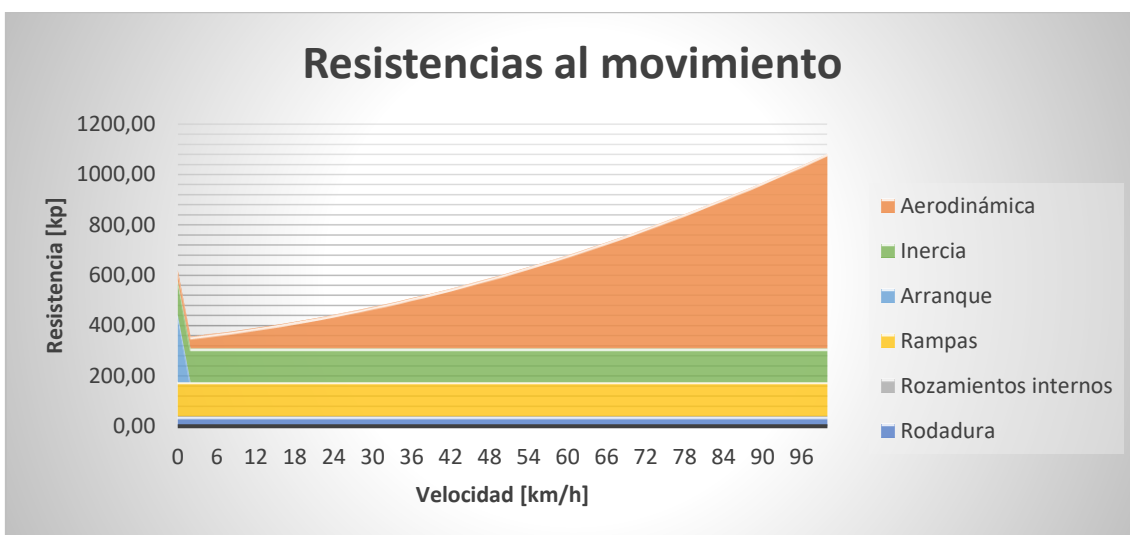


Figura 16. Resistencias al movimiento: Escenario 1 – 2 ejes

6.3.2 Escenario 2

En este escenario se puede apreciar la influencia que adquiere una rampa característica en el recorrido, en especial en el transporte de cargas elevadas, como puede apreciarse comparando las figuras 17 y 18.

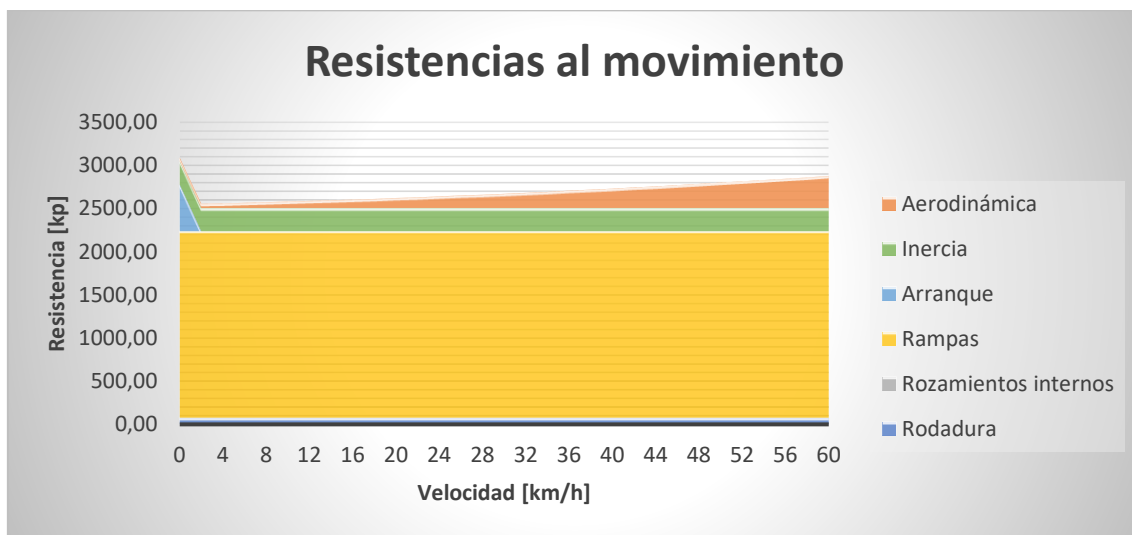


Figura 17. Resistencias al movimiento: Escenario 2 – 4 ejes

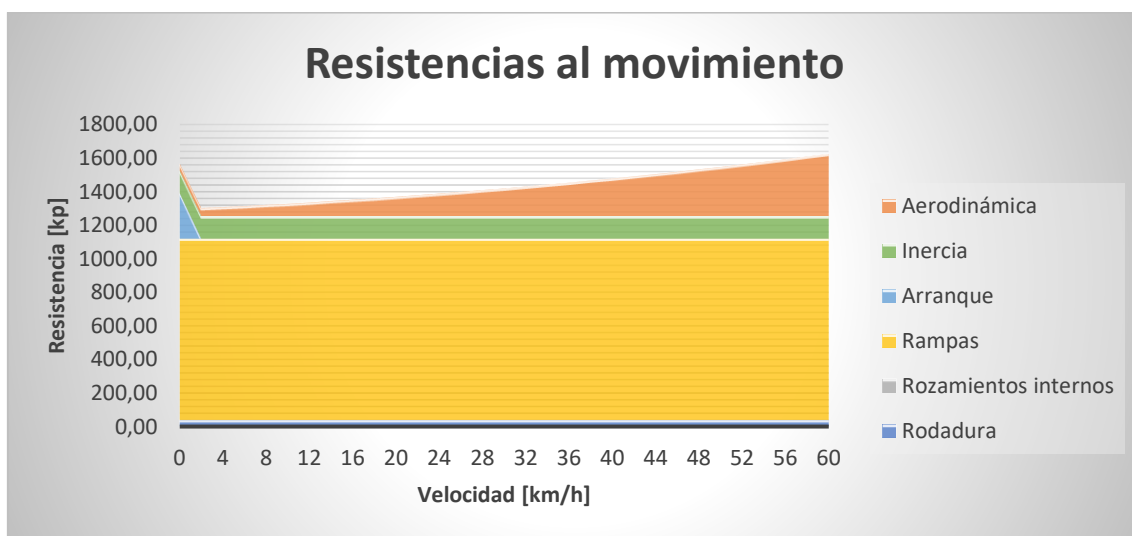


Figura 18. Resistencias al movimiento: Escenario 2 – 2 ejes

6.3.3 Escenario 3

En el escenario 3, el efecto que se aprecia es el opuesto al del escenario 2. La aerodinámica adquiere gran importancia cuando se trata de desplazar masas pequeñas a elevada velocidad sin grandes rampas características. Esto puede verse en las figuras 19 y 20.

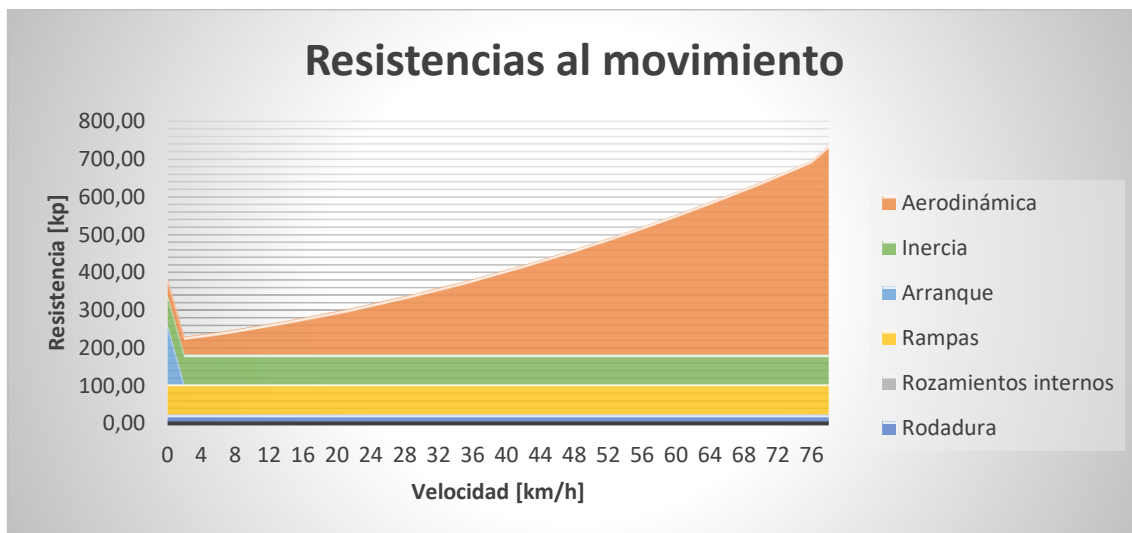


Figura 19. Resistencias al movimiento: Escenario 3 – 4 ejes

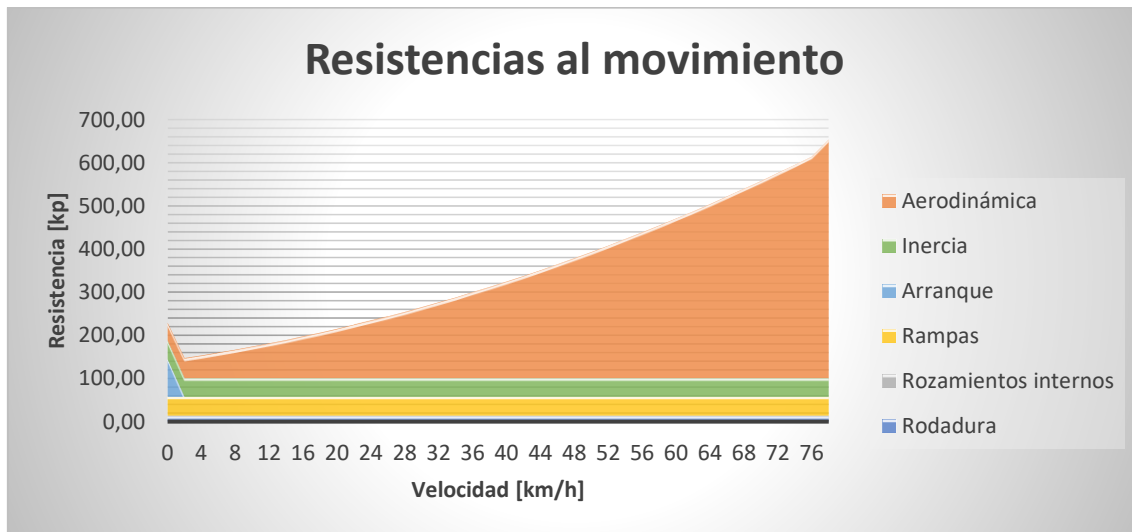


Figura 20. Resistencias al movimiento: Escenario 3 – 2 ejes

6.3.4 Escenario 4

En el escenario 4, el comodín, las mayores aportaciones a la resistencia total del vehículo vuelven a ser originadas por la resistencia aerodinámica y las rampas características, como se puede apreciar en las figuras 21 y 22.

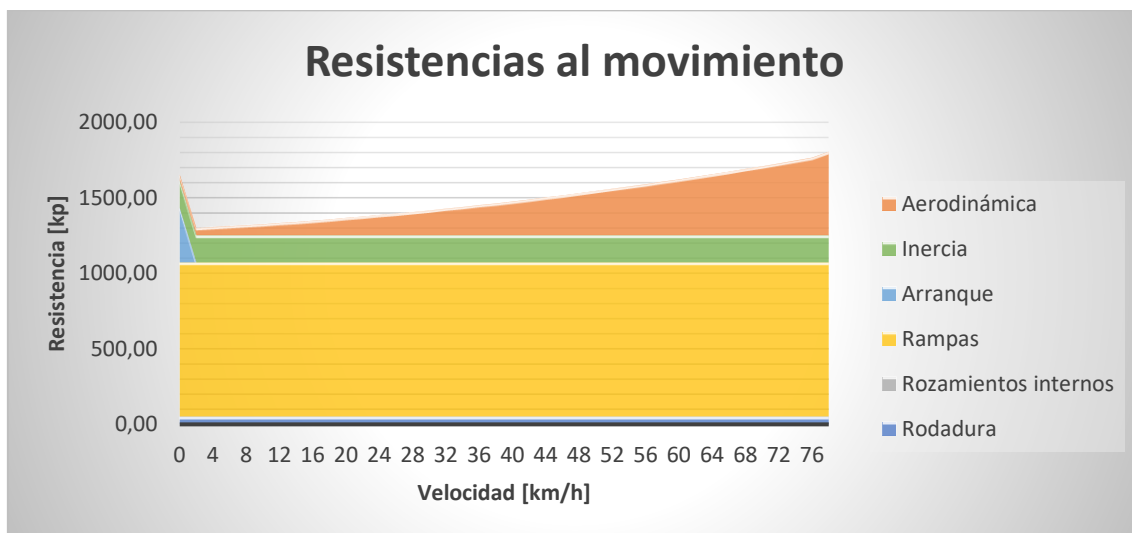


Figura 21. Resistencias al movimiento: Escenario 4 – 4 ejes

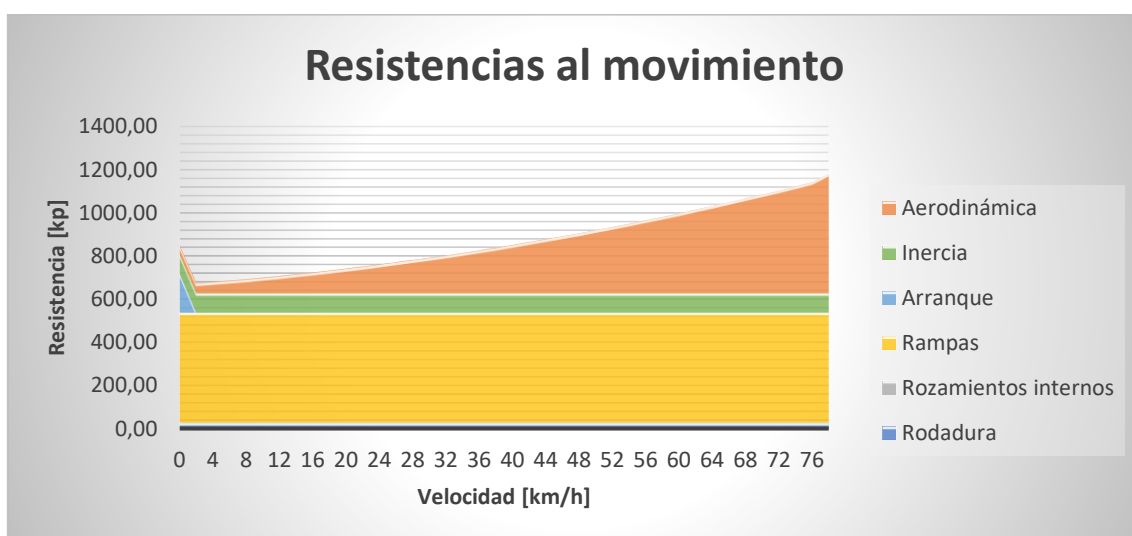


Figura 22. Resistencias al movimiento: Escenario 4 – 2 ejes

6.3.5 Resumen

Para finalizar, se presentan en la tabla 10 los valores máximos de resistencia de cada escenario para tener una visión global de las necesidades y los valores relativos al caso con mayor resistencia.

Tabla 10. Resistencia máxima por escenario

	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4	
	2 ejes	4 ejes	2 ejes	4 ejes	2 ejes	4 ejes	2 ejes	4 ejes
Resistencia máx.[kp]	1082	1390	1625	3090	653	736	1180	1805
Resistencia relativa	35%	45%	53%	100%	21%	24%	38%	58%

7. Análisis y optimización

7.1 Procedimiento de cálculo

Para alcanzar la solución de cada escenario se siguen tres pasos de manera iterativa, como se muestra en la figura 23. El primer paso es la introducción de los parámetros del escenario, entre los que se encuentran las variables del entorno (coeficiente de rodadura, coeficiente aerodinámico, velocidad del viento, etc) que son constantes en la comparación de escenarios y las variables del escenario (carga, número de ejes, velocidad, etc). El segundo paso consiste en la observación de las curvas características de los motores y el ajuste de su relación de transmisión. Por último, con las gráficas de los resultados, se pueden realizar pequeños ajustes en las relaciones de transmisión para comprobar si el motor puede llegar a cumplir con las especificaciones.



Figura 23. Pasos de cálculo

Dado que los motores tienen un rango de operación limitado en revoluciones, se hace necesario incorporar una caja de cambios para que se ajuste el régimen de giro del motor a la velocidad del vehículo. Con la inclusión de una caja de cambios, la relación de transmisión varía y también lo hace el par entregado por el motor. Teniendo en cuenta que el motor debe proporcionar un par superior a las resistencias para que el vehículo pueda continuar avanzando, se deben observar las curvas que proporciona el motor con diferentes relaciones de transmisión (marchas) y comprobar que cumple en todo el rango de velocidades previsto.

Dado que los motores diésel no otorgan par desde el inicio de su movimiento, se debe incorporar un embrague para ayudar al inicio de la marcha, por ello puede observarse en las gráficas con las curvas de adherencia, resistencia y tracción que la tracción no aparece por debajo de 10 km/h.

7.1 Procedimiento de ajuste de relaciones de marchas

A continuación, se muestra el procedimiento seguido para el ajuste de las relaciones de transmisión aplicadas en un motor para adecuarse al régimen de velocidad adecuado. Se presentan los cálculos para el motor Caso 1 - ISM11 Euro IV/Euro V, pensando en una velocidad máxima de 80 km/h.

El punto de partida es la curva par – velocidad de giro del motor, para tener los valores base del estudio, como se puede ver en la figura 24.

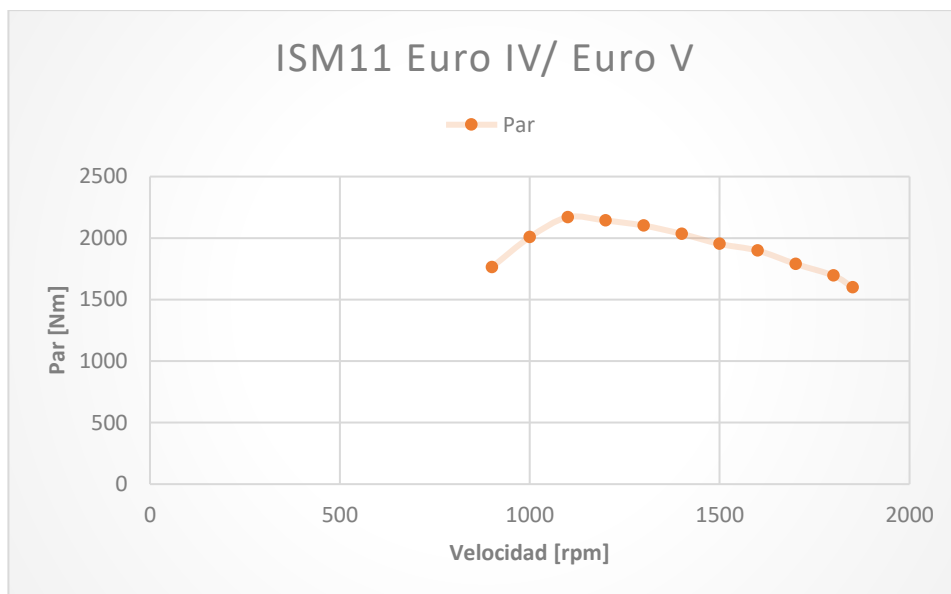


Figura 24. Curva par – velocidad de giro del ISM11 Euro IV/ Euro V

El siguiente paso a seguir es la obtención de la velocidad lineal y el esfuerzo que se va a lograr con la reducción por medio de las ecuaciones 12 y 13 respectivamente.

$$v_{lineal} \left[\frac{km}{h} \right] = \omega \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{R}{i'} \quad (Ec. 12)$$

$$E_m [kp] = \frac{M}{R} \frac{1}{9,8} i' \quad (Ec. 13)$$

Con los valores resultantes se pueden dibujar varias curvas del esfuerzo del motor superpuestas, como se ve en la figura 25.

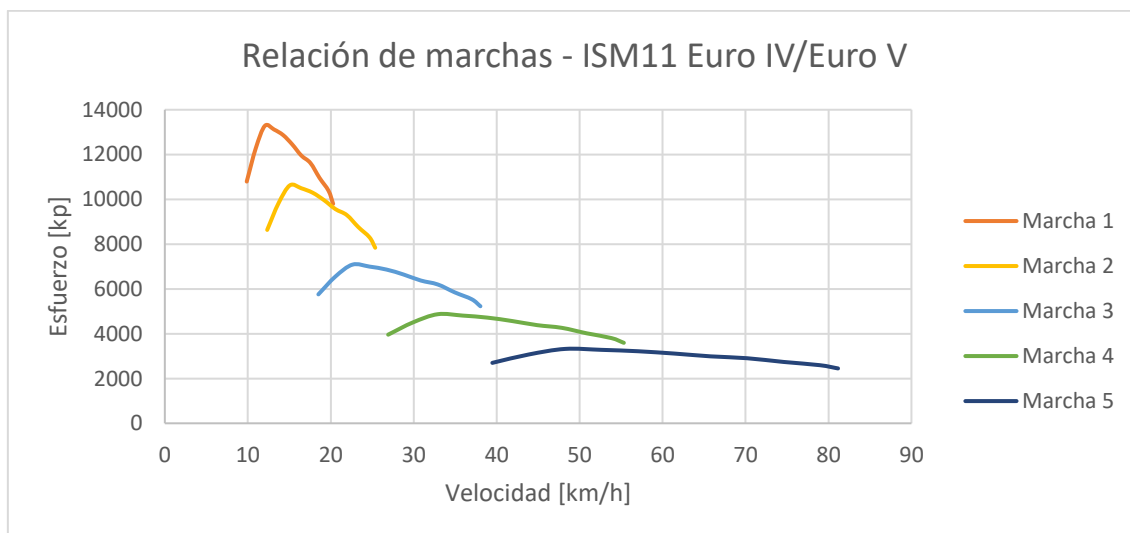


Figura 25. Relación de marchas: ISM11 Euro IV/Euro V

Estas curvas se han obtenido con las relaciones de reducción de la tabla 11.

Tabla 11. Relación de marchas inicial

Marcha	i'
Marcha 1	30
Marcha 2	18
Marcha 3	12
Marcha 4	8
Marcha 5	6

Para que la transmisión cumpla su función correctamente, la curva de dos marchas consecutivas debe solaparse cuando el par de la marcha menor se encuentra en tendencia decreciente y debe alcanzar la velocidad máxima para la que se está diseñando. En este caso, con la quinta marcha se supera la velocidad objetivo ampliamente. Con el rango empleado se está desperdiciando la capacidad del motor en la quinta marcha en regímenes de giro elevados, por lo que se podría ajustar siguiendo de dos maneras:

1. Eliminar la quinta marcha y alargar ligeramente el desarrollo de la cuarta marcha disminuyendo ligeramente la relación de reducción empleada en el cálculo. De esta manera, hay que incluir un engranaje menos en la transmisión, reduciendo la complejidad en el diseño y la fabricación y reduciendo también el peso de la caja de cambios.

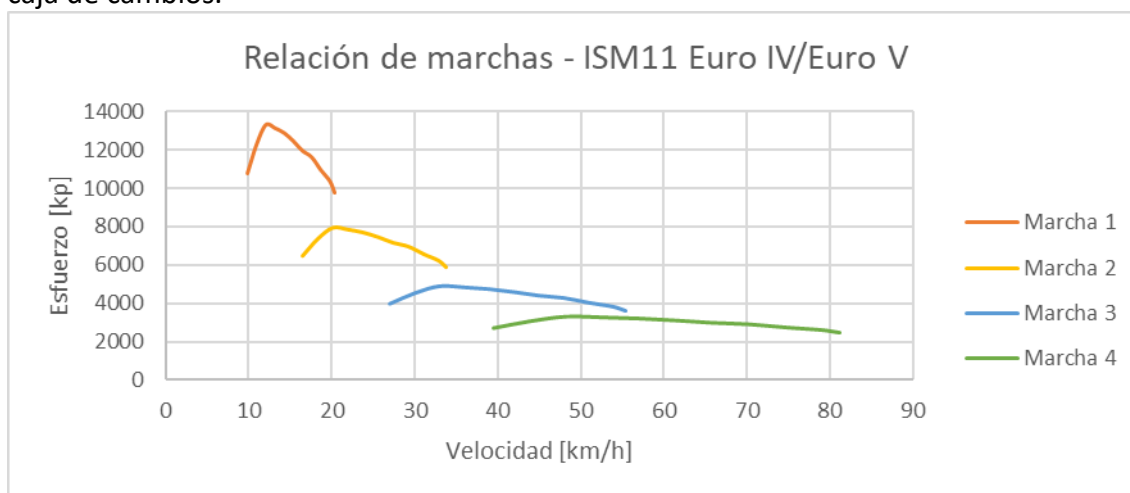


Figura 26. Relación de marchas, simplificación de caja de cambios

Tabla 12. Relación de marchas simplificada

Marcha	i'
Marcha 1	30
Marcha 2	18
Marcha 3	11
Marcha 4	7,5

- Mantener las cinco marchas, pero variando las relaciones de transmisión para aprovechar mejor el desarrollo que ofrece el motor en todo su rango. Con esta opción se logra un motor que puede aportar mayores esfuerzos a lo largo de todo su régimen de marcha, pues las curvas se aprietan y toman una forma más puntiaguda. Con más marchas también se consigue una transición más escalonada en todo el rango de velocidades.

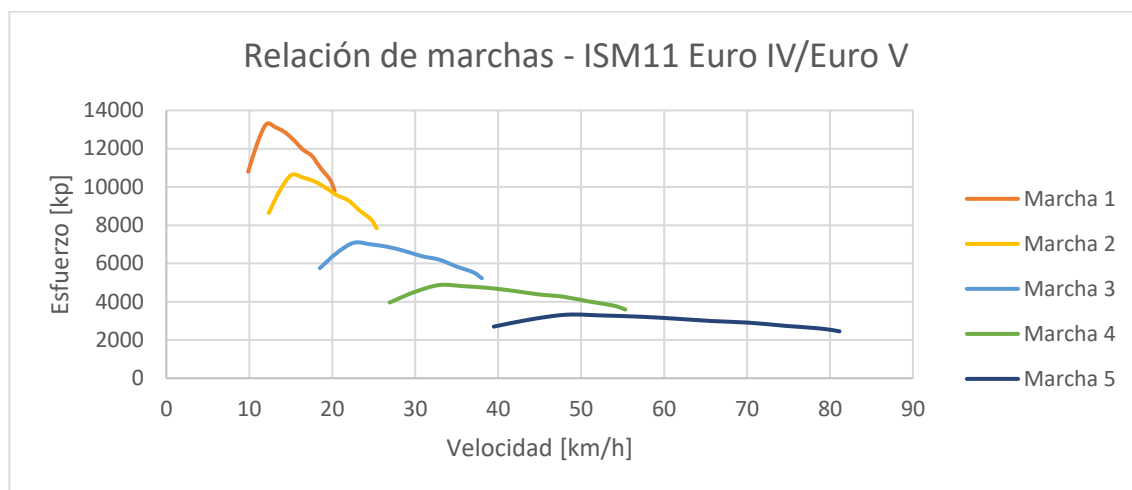


Figura 27. Relación de marchas, mejora rendimiento

Tabla 13. Relación de marchas, mejora de rendimiento

Marcha	i'
Marcha 1	30
Marcha 2	24
Marcha 3	16
Marcha 4	11
Marcha 5	7,5

7.2 Escenarios

En este capítulo se van a mostrar los resultados obtenidos de los cálculos. En primer lugar, se muestra la hoja en la que se introducen las variables de entrada. Después, se usa una gráfica para cada caso estudiado (4 escenarios, 2 tipos de vehículos) en la que se han representado las curvas de adherencia, resistencia y esfuerzo tractor en las diferentes marchas para el motor seleccionado. Se presenta también la relación de marchas que ha sido necesaria para alcanzar cada solución. En el Anexo II – Cálculos, se muestran todas las gráficas obtenidas.

Ante la posibilidad de que existan varias motorizaciones que tengan suficiente capacidad tractora, se seleccionará el motor que mejor se ajuste a las resistencias, de manera que pueda trabajar más tiempo en puntos de rendimiento elevado. Por otro lado, si las curvas de esfuerzo son más bajas, es más complicado que se rompa la adherencia, contribuyendo a que el motor pueda trabajar en puntos de mayor rendimiento.

7.2.1 Escenario 1

4 ejes

Características del vehículo	
Tara[t]	26,5
Carga[t]	63,5
Peso total[t]	90
n ejes	4
Peso por eje[t]	22,5

Rodadura	
δ [m]	1,80E-07
R - radio ruedas [m]	0,5
φ	8,49E-04
resistencia r*chi	0,0008
ψ	0,008
r - radio cojinetes [m]	0,1

Aerodinámica	
Superficie frontal [m ²]	11,6
Cx	0,8
ρ aire [kg/m ³]	1,225
v viento [km/h]	30

Aceleración	
a[cm/s ²]	3

Arranque	
Esfuerzo de arranque[kp/t]	6

Adherencia	
φ_{ad}	0,3

Pendiente	
i[‰]	3

Figura 28. Parámetros de entrada: escenario 1 – 4 ejes.

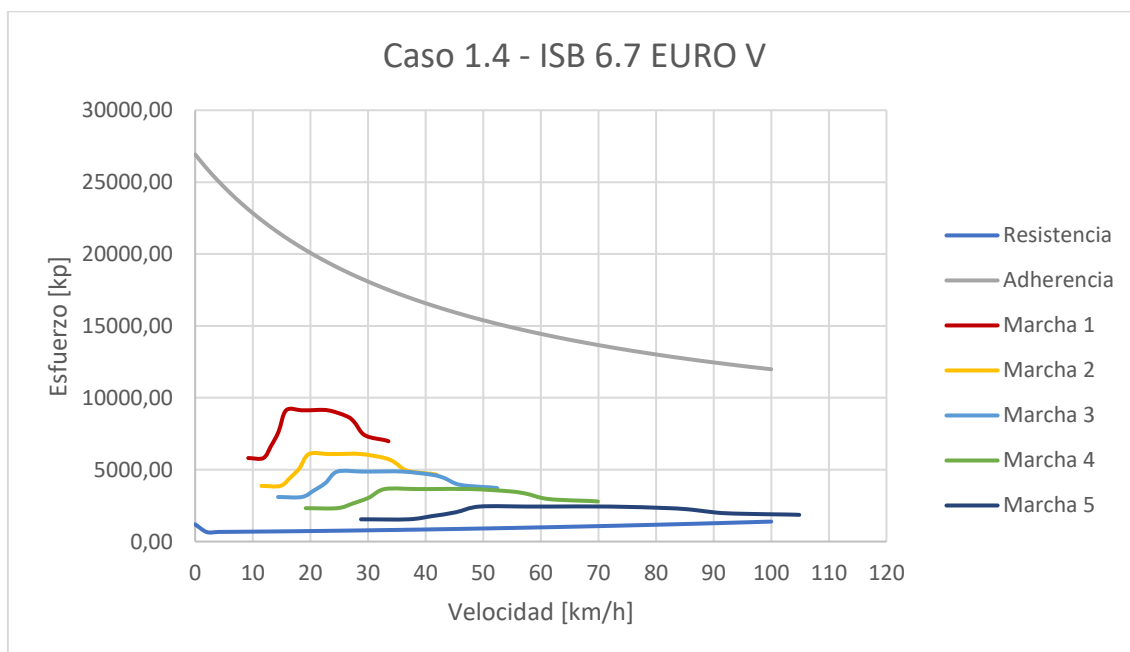


Figura 29. Caso 1.4: Curvas características diésel

El elevado peso total del vehículo hace que la curva de adherencia esté en todo momento por encima de la de esfuerzo, por lo que el motor puede trabajar a plena carga en todo su rango de operación.

Tabla 14. Caso 1.4: relación de marchas diésel

Marcha	i'
Marcha 1	25
Marcha 2	20
Marcha 3	16
Marcha 4	12
Marcha 5	8

2 ejes

Características del vehículo	
Tara[t]	14,5
Carga[t]	30,5
Peso total[t]	45
n ejes	2
Peso por eje[t]	22,5

Rodadura	
δ [m]	1,80E-07
R - radio ruedas [m]	0,5
φ	8,49E-04
resistencia $r \cdot \chi$	0,0008
ψ	0,008
r - radio cojinetes [m]	0,1

Aerodinámica	
Superficie frontal [m ²]	11,84
Cx	0,8
ρ aire [kg/m ³]	1,225
v viento [km/h]	30

Aceleración	
a[cm/s ²]	3

Arranque	
Esfuerzo de arranque[kp/t]	6

Adherencia	
φ_{ad}	0,3

Pendiente	
i[%]	3

Figura 30. Parámetros de entrada: Escenario 1 – 2 ejes

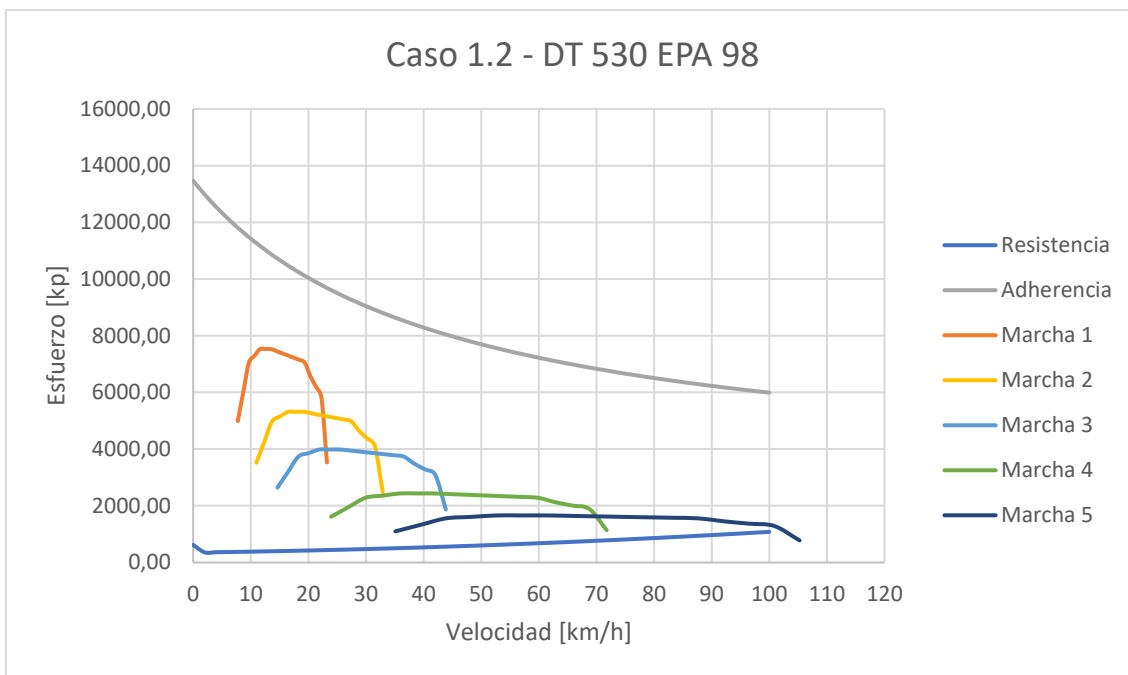


Figura 31. Caso 1.2: Curvas características diésel

A pesar de haber reducido el peso total a la mitad, la carga por eje continúa siendo elevada, por lo que se aprecia la misma situación que en el caso 1 – 4 ejes.

Tabla 15. Caso 1.2: relación de marchas diésel

Marcha	i'
Marcha 1	34
Marcha 2	24
Marcha 3	18
Marcha 4	11
Marcha 5	7,5

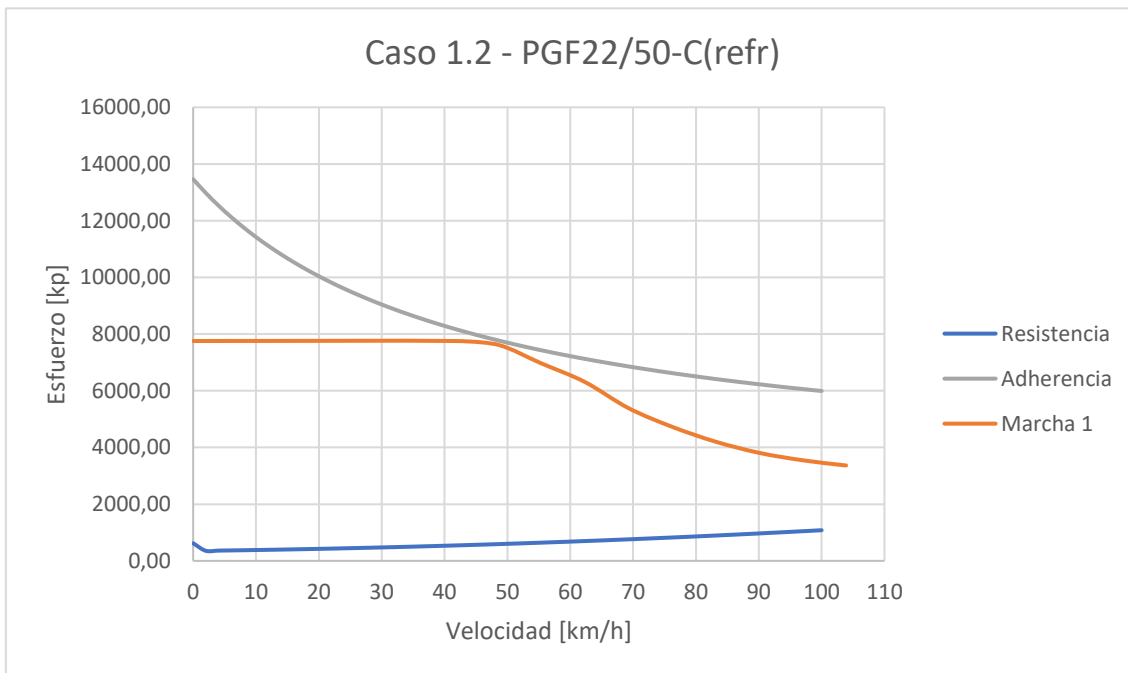


Figura 32. Caso 1.2: Curvas características eléctrica

En este escenario con tracción eléctrica, el esfuerzo tractor máximo sigue estando delimitado por el esfuerzo motor.

Tabla 16. Caso 1.2: relación de reducción tracción eléctrica

Marcha	i'
Marcha 1	9,5

7.2.2 Escenario 2

4 ejes

Características del vehículo	
Tara[t]	26,5
Carga[t]	63,5
Peso total[t]	90
n ejes	4
Peso por eje[t]	22,5

Rodadura	
δ [m]	1,80E-07
R - radio ruedas [m]	0,5
φ	8,49E-04
resistencia r*chi	0,0008
Ψ	0,008
r - radio cojinetes [m]	0,1

Aerodinámica	
Superficie frontal [m2]	11,84
Cx	0,8
ρ aire [kg/m3]	1,225
v viento [km/h]	30

Aceleración	
a[cm/s^2]	3

Arranque	
Esfuerzo de arranque[kp/t]	6

Adherencia	
φ_{ad}	0,3

Pendiente	
i[‰]	24

Figura 33. Parámetros de entrada: Escenario 2 – 4 ejes

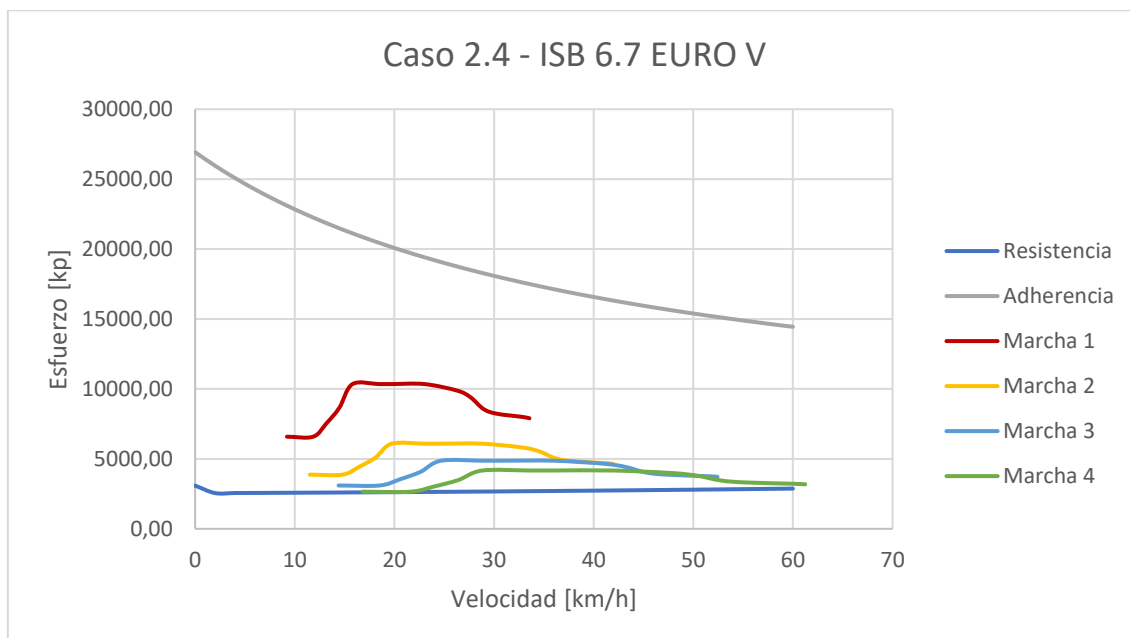


Figura 34. Caso 2.4: Curvas características diésel

Las cargas y pendientes elevadas de este escenario vuelven a mostrar una curva de adherencia de valores grandes, evitando la rotura de adherencia en el rango de operación.

Tabla 17. Caso 2.4: relación de marchas diésel

Marcha	i'
Marcha 1	25
Marcha 2	20
Marcha 3	16
Marcha 4	13,7

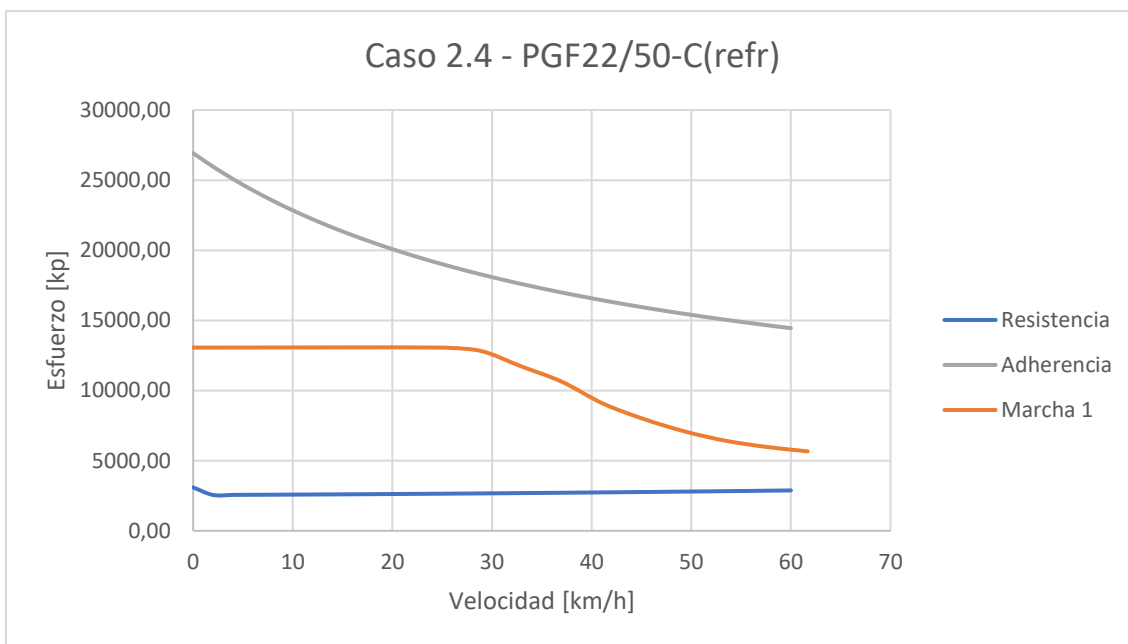


Figura 35. Caso 2.4: Curvas características eléctrica

Tabla 18. Caso 2.4: relación de reducción tracción eléctrica

Marcha	i'
Marcha 1	16

2 ejes

Características del vehículo	
Tara[t]	14,5
Carga[t]	30,5
Peso total[t]	45
n ejes	2
Peso por eje[t]	22,5

Rodadura	
δ [m]	1,80E-07
R - radio ruedas [m]	0,5
φ	8,49E-04
resistencia r*chi	0,0008
ψ	0,008
r - radio cojinetes [m]	0,1

Aerodinámica	
Superficie frontal [m2]	11,84
Cx	0,8
ρ aire [kg/m3]	1,225
v viento [km/h]	30

Aceleración	
a[cm/s^2]	3

Arranque	
Esfuerzo de arranque[kp/t]	6

Adherencia	
φ_{ad}	0,3

Pendiente	
i[‰]	24

Figura 36. Parámetros de entrada: Escenario 2 – 2 ejes

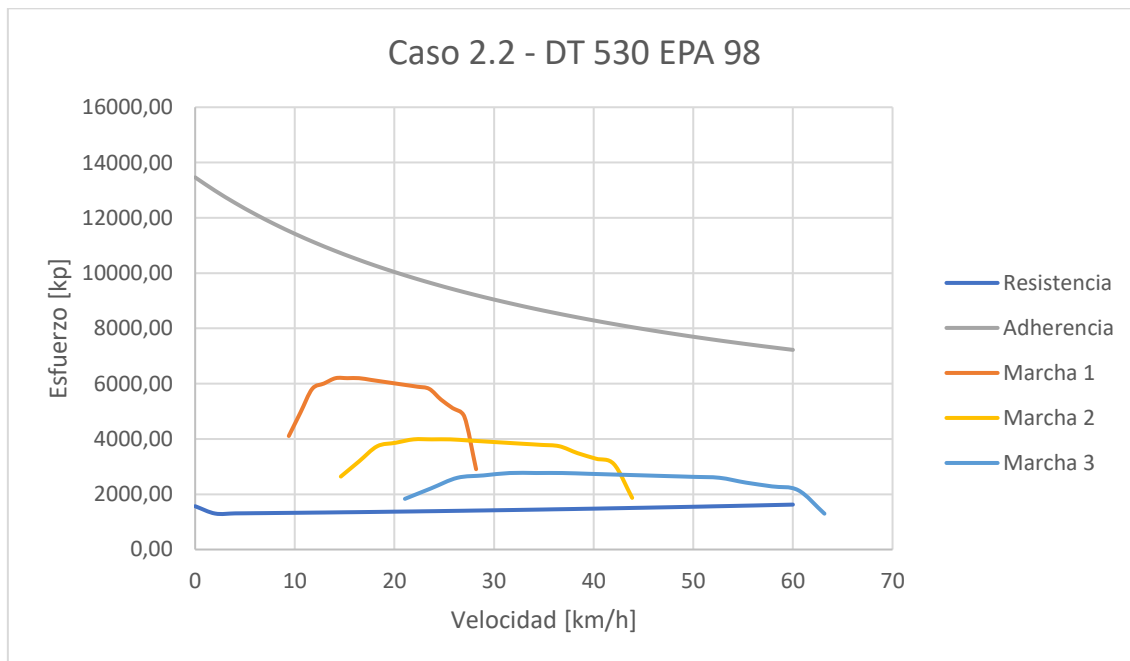


Figura 37. Caso 2.2: Curvas características diésel

La velocidad reducida del escenario, unida a un peso total limitado por el peso máximo por eje permiten seleccionar un motor que sólo precisa de tres marchas para cubrir el rango de operación con garantías.

Tabla 19. Caso 2.2: relación de marchas diésel

Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	18
Marcha 3	12,5

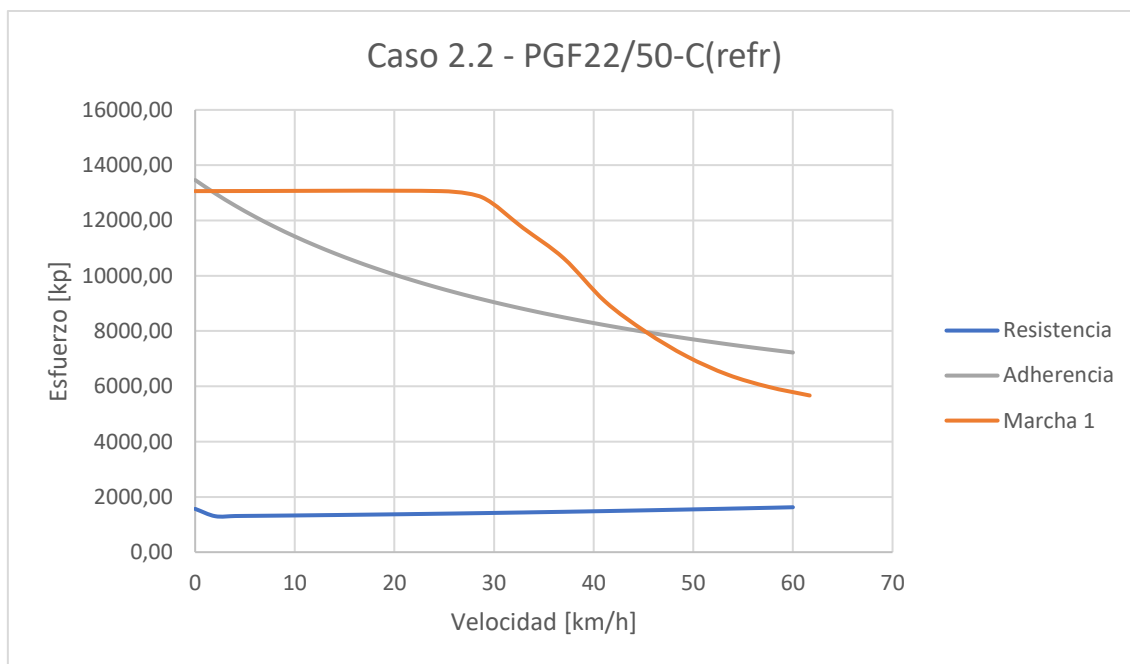


Figura 38. Caso 2.2: Curvas características eléctrica

Como se ha visto en el capítulo 3, la adherencia tiene un comportamiento lineal con el peso del vehículo. Al reducir el peso a la mitad respecto de la situación con 4 ejes, se ve como el esfuerzo motor supera la curva de adherencia en un rango amplio de operación. En ese rango la capacidad máxima de aceleración del vehículo estará limitada por la adherencia. No será hasta los 45 km/h cuando la capacidad de aceleración la limite el motor.

Tabla 20. Caso 2.2: relación de reducción tracción eléctrica

Marcha	i'
Marcha 1	16

7.2.3 Escenario 3

4 ejes

Características del vehículo	
Tara[t]	26,5
Carga[t]	0
Peso total[t]	26,5
n ejes	4
Peso por eje[t]	6,625

Rodadura	
δ [m]	1,80E-07
R - radio ruedas [m]	0,5
φ	8,49E-04
resistencia r*chi	0,0008
ψ	0,008
r - radio cojinetes [m]	0,1

Aerodinámica	
Superficie frontal [m ²]	11,84
Cx	0,8
ρ aire [kg/m ³]	1,225
v viento [km/h]	30

Aceleración	
a[cm/s ²]	3

Arranque	
Esfuerzo de arranque[kp/t]	6

Adherencia	
φ_{ad}	0,3

Pendiente	
i[‰]	3

Figura 39. Parámetros de entrada: Escenario 3 – 4 ejes

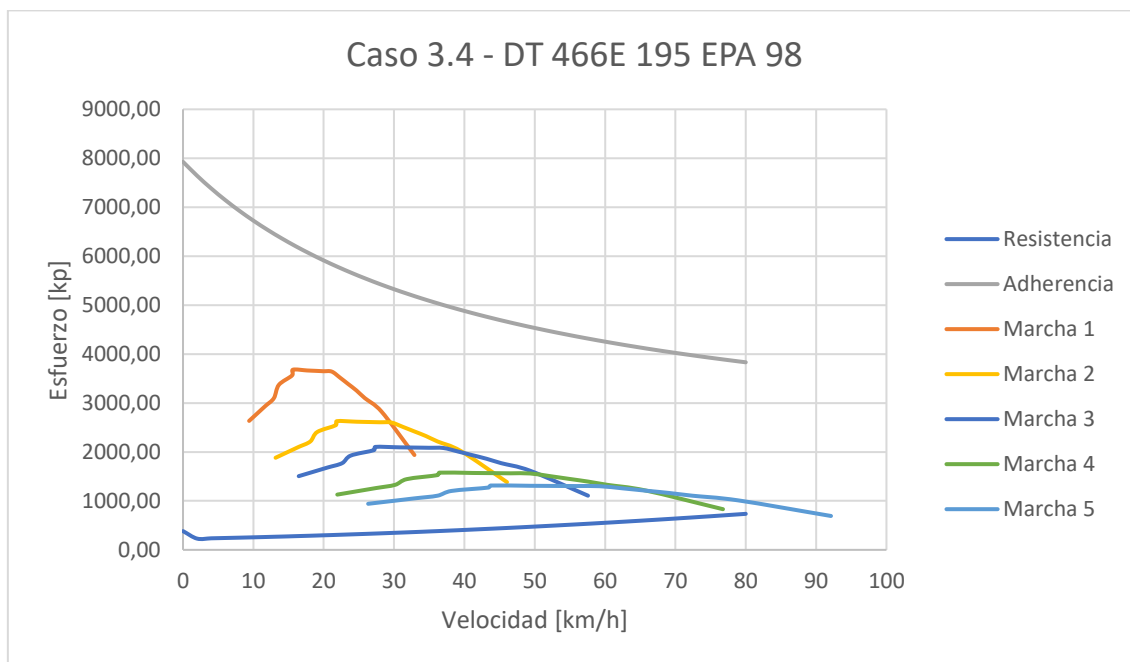


Figura 40. Caso 3.4: Curvas características diésel

Este escenario genera unos requerimientos de potencia bajos, lo que permite usar un motor pequeño, bastante próximo a la curva de resistencia y siempre por debajo de la curva de adherencia.

Tabla 21. Caso 3.4: relación de marchas diésel

Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	20
Marcha 3	16
Marcha 4	12
Marcha 5	10

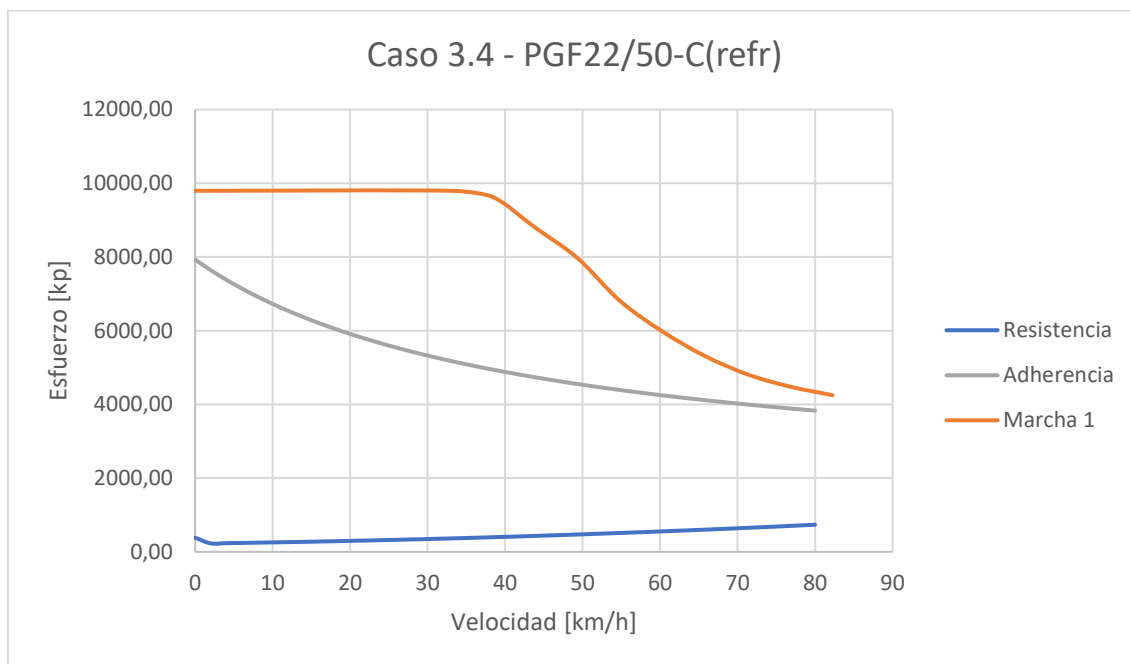


Figura 41. Caso 3.4: Curvas características eléctrica

En la tracción eléctrica, al contrario que en la tracción diésel, el esfuerzo se encuentra en todo momento por encima de la adherencia, lo que va a limitar el potencial del motor. El motor de menor potencia pierde par rápidamente, por lo que no es capaz de mantener un esfuerzo resultante positivo a altas velocidades y obliga a elegir un motor mayor.

Tabla 22. Caso 3.4: relación de reducción tracción eléctrica

Marcha	i'
Marcha 1	12

2 ejes

Características del vehículo	
Tara[t]	14,5
Carga[t]	0
Peso total[t]	14,5
n ejes	2
Peso por eje[t]	7,25

Rodadura	
δ [m]	1,80E-07
R - radio ruedas [m]	0,5
φ	8,49E-04
resistencia r*chi	0,0008
Ψ	0,008
r - radio cojinetes [m]	0,1

Aerodinámica	
Superficie frontal [m2]	11,84
Cx	0,8
ρ aire [kg/m3]	1,225
v viento [km/h]	30

Aceleración	
a[cm/s^2]	3

Arranque	
Esfuerzo de arranque[kp/t]	6

Adherencia	
φ_{ad}	0,3

Pendiente	
i[‰]	3

Figura 42. Parámetros de entrada: Escenario 3 – 2 ejes

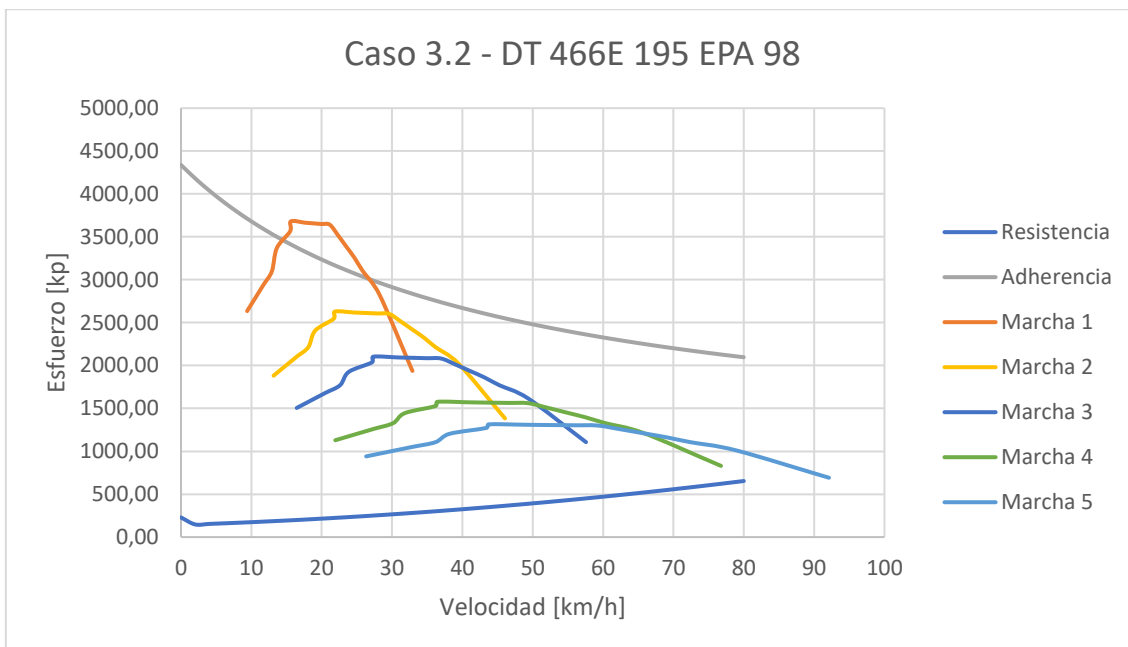


Figura 43. Caso 3.2: Curvas características diésel

El escenario con 2 ejes requiere el menor esfuerzo de todos los estudiados. El peso es tan pequeño que incluso el motor de menor potencia supera el límite de adherencia en una región, haciendo necesario el control de tracción a bajas velocidades.

Tabla 23. Caso 3.2: relación de marchas diésel

Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	20
Marcha 3	16
Marcha 4	12
Marcha 5	10

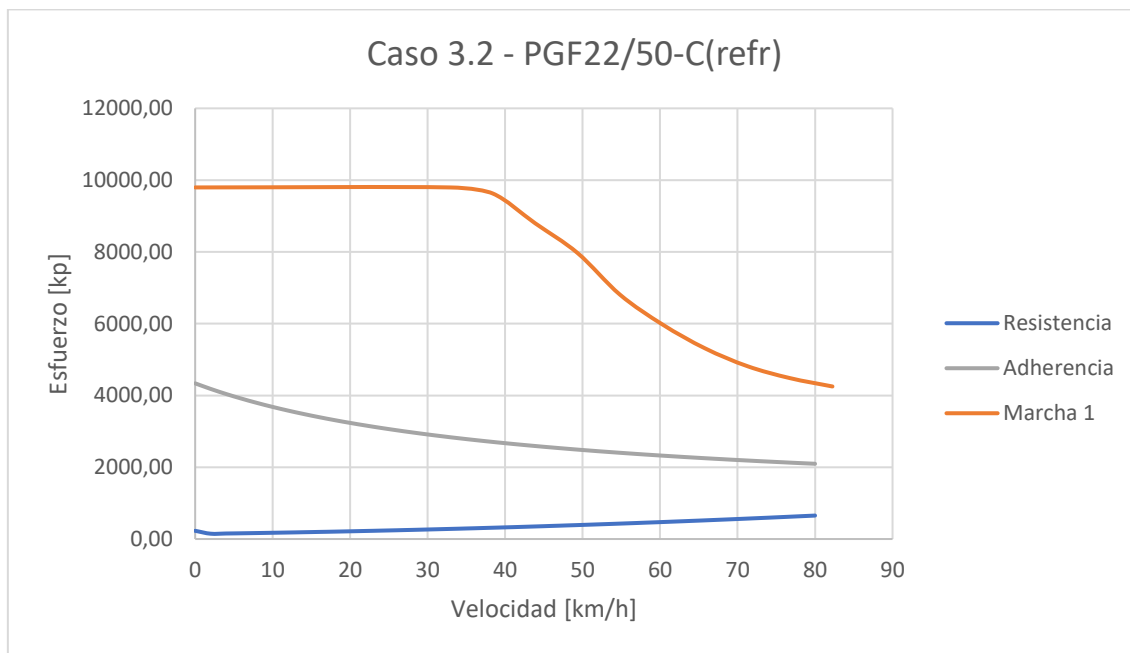


Figura 44. Caso 3.2: Curvas características eléctrica

Al igual que en el caso 3 – 4 ejes, la tracción eléctrica es demasiado grande para las sollicitaciones de resistencia y las condiciones de adherencia.

Tabla 24. Caso 3.2: relación de reducción tracción eléctrica

Marcha	i'
Marcha 1	12

7.2.4 Escenario 4

4 ejes

Características del vehículo	
Tara[t]	26,5
Carga[t]	63,5
Peso total[t]	90
n ejes	4
Peso por eje[t]	22,5

Rodadura	
δ [m]	1,80E-07
R - radio ruedas [m]	0,5
φ	8,49E-04
resistencia r*chi	0,0008
Ψ	0,008
r - radio cojinetes [m]	0,1

Aerodinámica	
Superficie frontal [m2]	11,84
Cx	0,8
ρ aire [kg/m3]	1,225
v viento [km/h]	30

Aceleración	
a[cm/s^2]	3

Arranque	
Esfuerzo de arranque[kp/t]	6

Adherencia	
φ_{ad}	0,3

Pendiente	
i[‰]	17

Figura 45. Parámetros de entrada: Escenario 4 – 4 ejes

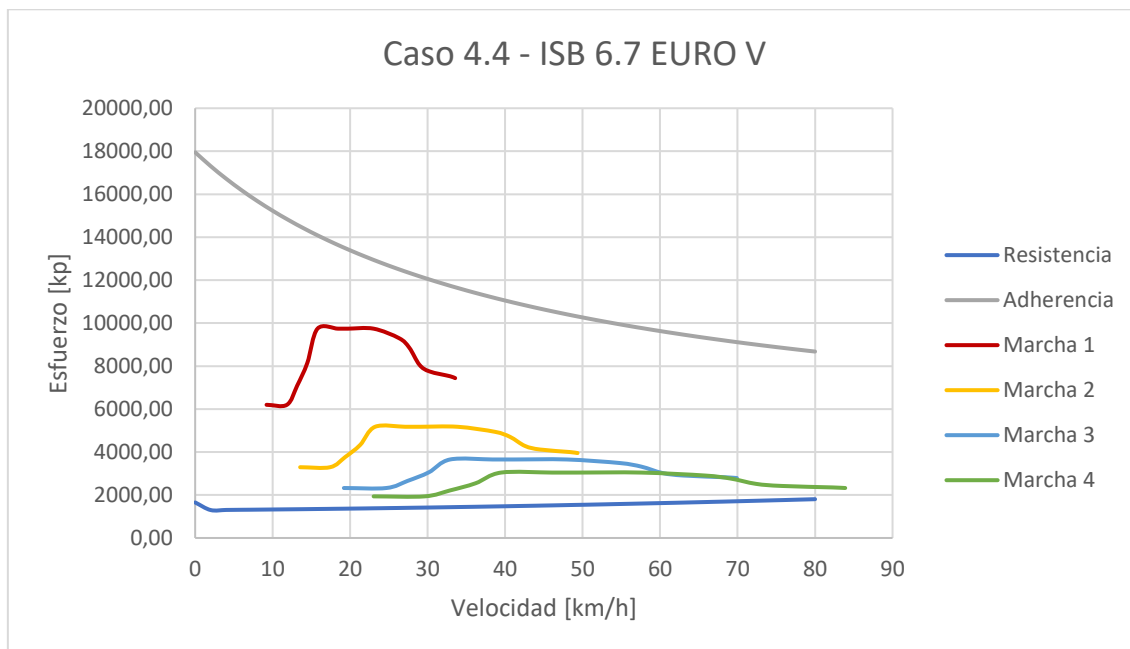


Figura 46. Caso 4.4: Curvas características diésel

Tabla 25. Caso 4.4: relación de marchas diésel

Marcha	i'
Marcha 1	25
Marcha 2	17
Marcha 3	12
Marcha 4	10

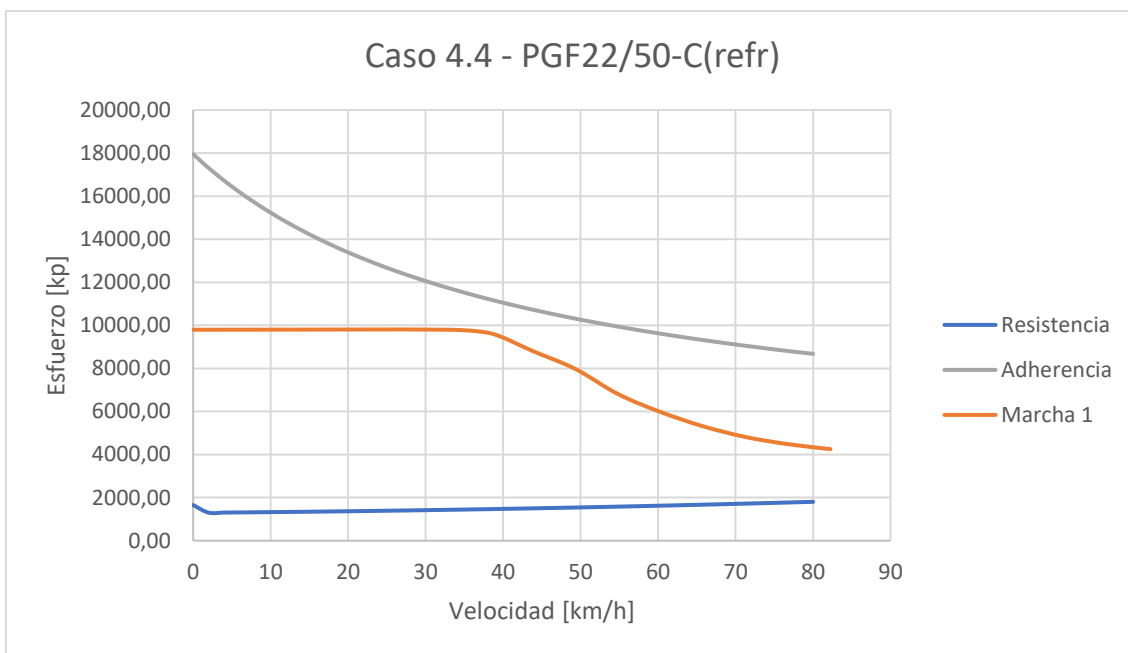


Figura 47. Caso 4.4: Curvas características eléctrica

Tabla 26. Caso 4.2: relación de reducción tracción eléctrica

Marcha	i'
Marcha 1	12

2 ejes

Características del vehículo	
Tara[t]	14,5
Carga[t]	15,5
Peso total[t]	30
n ejes	2
Peso por eje[t]	15

Rodadura	
δ [m]	1,80E-07
R - radio ruedas [m]	0,5
φ	8,49E-04
resistencia r*chi	0,0008
ψ	0,008
r - radio cojinetes [m]	0,1

Aerodinámica	
Superficie frontal [m2]	11,84
Cx	0,8
ρ aire [kg/m3]	1,225
v viento [km/h]	30

Aceleración	
a[cm/s^2]	3

Arranque	
Esfuerzo de arranque[kp/t]	6

Adherencia	
φ_{ad}	0,3

Pendiente	
i[‰]	17

Figura 48. Parámetros de entrada: Escenario 4 – 2 ejes

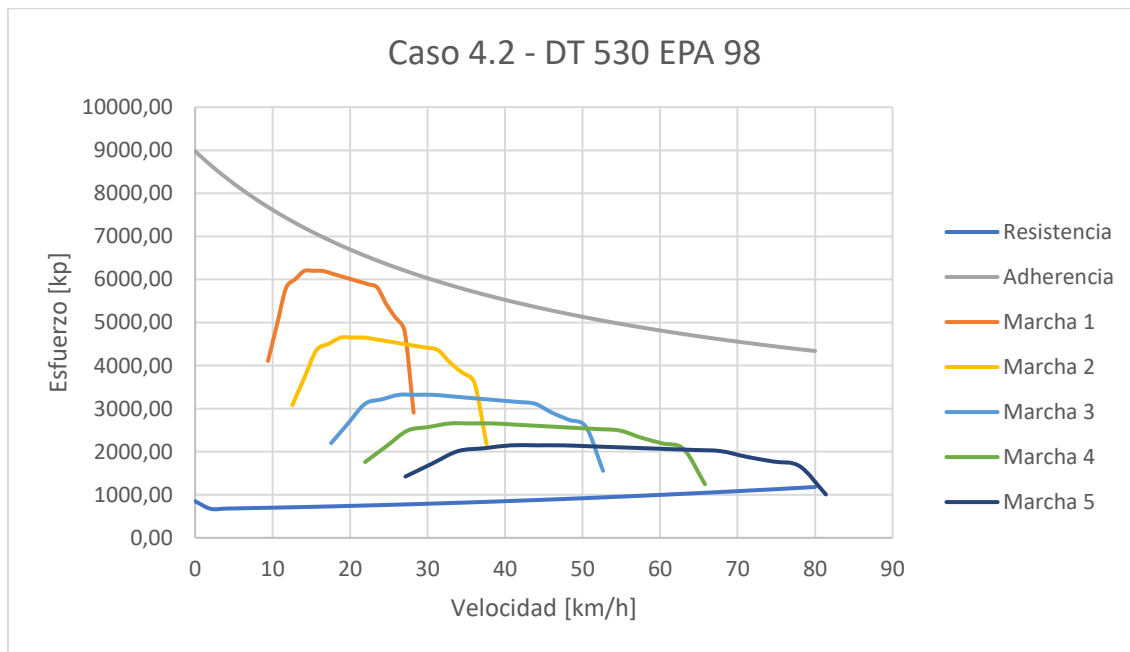


Figura 49. Caso 4.2: Curvas características diésel

Tabla 27. Caso 4.2: relación de marchas diésel

Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	21
Marcha 3	15
Marcha 4	12
Marcha 5	9,7

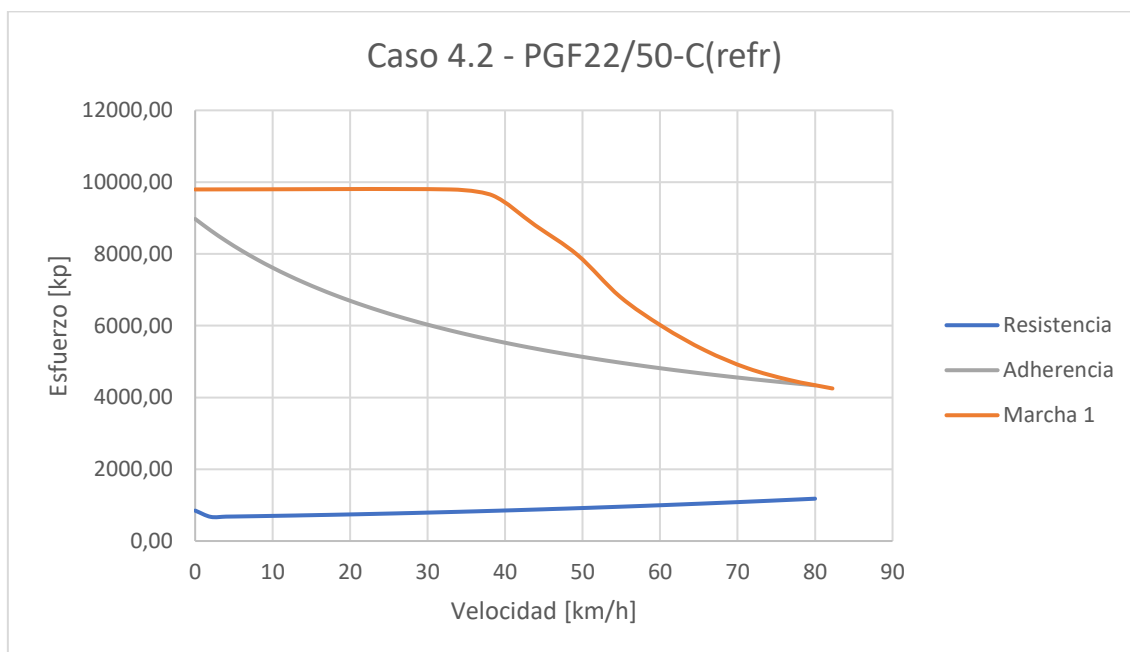


Figura 50. Caso 4.2: Curvas características eléctrica

Tabla 28. Caso 4.2: relación de reducción tracción eléctrica

Marcha	i'
Marcha 1	12

8. Obtención de resultados y determinación de diseño final

En este capítulo se hace una recopilación de los resultados obtenidos, para proponer el diseño de la motorización del vagón. En la tabla 29 se han organizado las alternativas propuestas para cada escenario, tipología y tracción. Se puede observar que en la tracción eléctrica solo cumple el motor PGF22/50-C. Esto se debe a que en el proceso para determinar la relación de transmisión se ha decidido que el régimen de giro máximo debe coincidir con la velocidad máxima del vehículo en el escenario. También, ocasionado por esta condición de diseño, se ha dado el caso de no tener capacidad de tracción suficiente con una motorización eléctrica en el escenario 1 con 4 ejes.

Los resultados de la tracción diésel ofrecen mayor variedad de soluciones, pues el rango de potencias ofrecido se ajusta más a las necesidades. Esto es un indicador de que las potencias estimadas antes de comenzar el estudio eran acertadas.

Tabla 29. Motorización por escenario, diseño final

	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4	
Tracción	2 ejes	4 ejes	2 ejes	4 ejes	2 ejes	4 ejes	2 ejes	4 ejes
Diésel	DT 530 EPA 98	DT 570 EPA 04	DT 530 EPA 98	ISB 6.7 EURO V	DT 466E 195 EPA 98	DT 466E 195 EPA 98	DT 530 EPA 98	ISB 6.7 EURO V
Eléctrica	PGF22/50-C	-	PGF22/50-C	PGF22/50-C	PGF22/50-C	PGF22/50-C	PGF22/50-C	PGF22/50-C

Las soluciones aportadas están pensadas en cubrir de manera específica un servicio. Este diseño dedicado puede limitar la flexibilidad del servicio, por lo que se plantea un diseño único de vagón autopropulsado, con capacidad de tracción en todos los escenarios propuestos. El motor ISM11 Euro IV/Euro V da la posibilidad de utilizar el vagón en situaciones más variadas. No se trata del motor más potente, pero con las variaciones en las relaciones de transmisión y por su curva de par, tiene un mejor despliegue que el ISX15 Euro IV/Euro V a altas revoluciones.

9. Conclusiones

En primer lugar, se ha podido comprobar tras realizar el estudio que existe la capacidad técnica para desarrollar un vagón de mercancías autopropulsado, pues existen otros vehículos ferroviarios similares que ya hacen uso de la autopropulsión. La implantación de esta tipología en los vehículos para el transporte de mercancías puede suponer un impulso a la utilización del ferrocarril y la mejora de la competitividad, así como en la reducción de las emisiones. Un planteamiento adecuado, con la integración de nuevas tecnologías de comunicación (el internet de las cosas, red 5G...) puede provocar la aparición de un nuevo paradigma en el transporte de las mercancías por ferrocarril, facilitando la operativa o permitiendo mayor flexibilidad.

Para continuar, con las bases asentadas en el estudio de las características del ferrocarril y las alternativas de tracción, se han definido unos escenarios que permiten evaluar las prestaciones que necesita un vagón autopropulsado en situaciones donde, a priori, puede implementarse al ofrecer ventajas respecto a la operativa y los costes que ofrecen los vehículos ferroviarios de transporte de mercancías tradicionales.

Con los cálculos realizados, se han obtenido las prestaciones mínimas requeridas en cada caso de estudio. A partir de estas prestaciones, se han propuesto alternativas para el diseño del sistema de propulsión del vagón.

En los trenes la capacidad tractora puede estar limitada por el esfuerzo que el motor es capaz de aportar o por la adherencia. Cuando la capacidad está limitada por la adherencia, los motores no pueden trabajar a plena carga. Cuando se opera bajo estas condiciones, el rendimiento que se puede extraer de los motores puede no ser el máximo. Por el contrario, si la capacidad de tracción está limitada por el esfuerzo del motor, se le permite aprovechar todo su rango dinámico, permitiendo aprovechar los puntos de operación con rendimiento máximo, sin necesidad de preocuparse de la rotura de la adherencia. Este comportamiento se ha podido observar en los vagones autopropulsados con un peso por eje elevado. Cuando esto ocurre, el peso adherente es muy elevado, favoreciendo la adherencia y, en consecuencia, la transmisión del esfuerzo. En los casos de estudio con pesos por eje reducidos, se han observado motores que sobrepasaban la curva de adherencia, no terminando de ser idóneos para el escenario por las razones expuestas. En estos casos habría que plantear el estudio con motorizaciones de menor par y potencia, para adaptarse mejor a las condiciones.

Por otro lado, se ha podido estudiar la capacidad de tracción que ofrecen los motores eléctricos. Por las características de su funcionamiento, resultan una opción atractiva para grandes composiciones, ya que los esfuerzos en el arranque son muy elevados, pero coinciden con el régimen de giro de par máximo que ofrecen los motores. Sin embargo, durante la realización del trabajo, debido al aumento de las revoluciones, se ha apreciado que las curvas de esfuerzo, sin importar la relación de transmisión empleada, siguen la misma tendencia y alcanzan un punto común. Por esto, la relación de transmisión de los motores eléctricos no debe calcularse para que el régimen de giro máximo coincida con la máxima velocidad, pues se estaría desaprovechando el par y una de las fortalezas de estos motores, haciendo necesaria la instalación de grandes motores, con potencias equivalentes o incluso superiores a los motores diésel capaces de aportar capacidad tractora en la misma situación.

Durante el desarrollo del trabajo, he tenido la ocasión de intensificar en los conocimientos específicos de cada disciplina de la ingeniería tratada y la integración de todos los sistemas para conseguir los resultados, como en el ámbito del transporte, en el cual he podido profundizar en la dinámica que gobierna el movimiento de los vehículos ferroviarios. También he trabajado los conceptos de la tracción y la adherencia, en torno a los cuales han girado los cálculos. Por otro lado, he trabajado en la disciplina de las máquinas, en concreto, en las curvas características de los motores y el diseño de las transmisiones.

10. Líneas futuras

El estudio se ha centrado en la capacidad tractora del vehículo, sin entrar en la operativa. El paso lógico, antes de desarrollar los sistemas de control, es analizar las características del consumo energético de las opciones diseñadas y estudiar su viabilidad. En especial, sería interesante el estudio para las alternativas de tracción diésel o híbrida, por la necesidad de espacio para el almacenamiento de la energía. Este estudio podría acompañarse del uso de una herramienta de simulación, que, con una correcta caracterización del sistema, puede aportar versatilidad a los cálculos y comprobar la evolución dinámica de los KPI que se definan.

Otro estudio que continúa con la línea marcada en el presente trabajo puede estar relacionado con la capacidad de remolque que se tiene en estos vehículos y si pueden suponer un ahorro energético, por ejemplo, arrastrando 1, 2 ó 3 coches. Inicialmente el ferrocarril se concibió para el remolque de grandes cargas, pero los avances en los sistemas de control y seguridad pueden derivar en que, para transportar la misma carga, exista la alternativa de utilizar composiciones más cortas con un vagón autopropulsado a la cabeza, manteniendo distancias cortas entre las composiciones y utilizando motores de menores potencias, con las ventajas que conllevan (reducción de peso, facilidad de recambios, precio, etc).

Al mismo tiempo, el vehículo tiene buena sinergia con la tecnología de “Smart driving”. Se trata de algoritmos aplicados al transporte por carretera. Estos algoritmos planifican las rutas a seguir por los transportistas, con el objetivo de establecer un comportamiento homogéneo entre todos los conductores y reducir el consumo, ya que la planificación incluye paradas y velocidades para optimizar la energía cumpliendo los plazos de entrega. Con la tecnología “Smart driving” aplicada al ferrocarril puede lograrse un avance importante en la reducción del consumo energético y ayudar en la consecución de los objetivos de competitividad.

Por último, basándose en el presente trabajo se podría desarrollar un estudio referente a las fuentes alternativas de energía, como el hidrógeno o el gas natural, y ampliar los casos. Estas tecnologías son más limpias que el diésel y pueden ayudar a la transición hacia las energías renovables. Además, mientras no esté la red ferroviaria completamente electrificada, requieren una inversión menor.

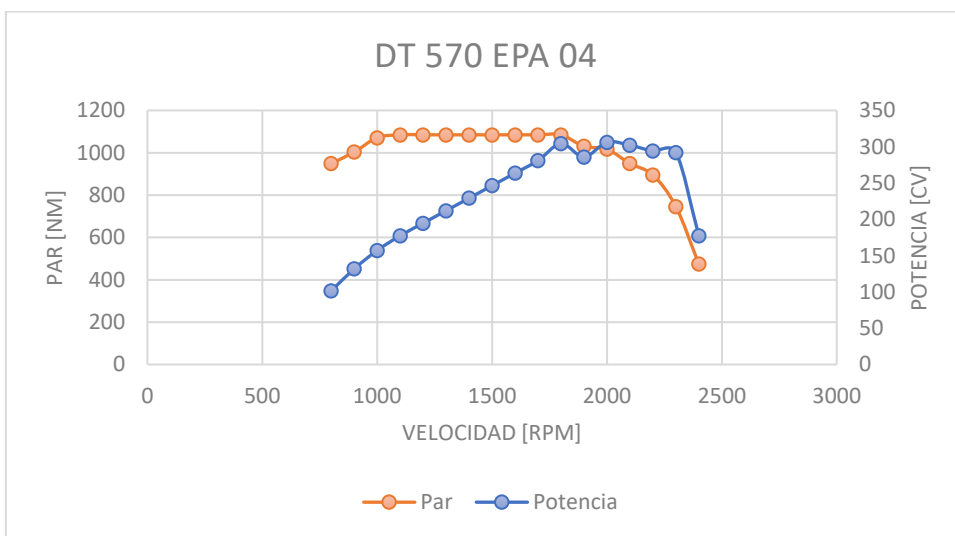
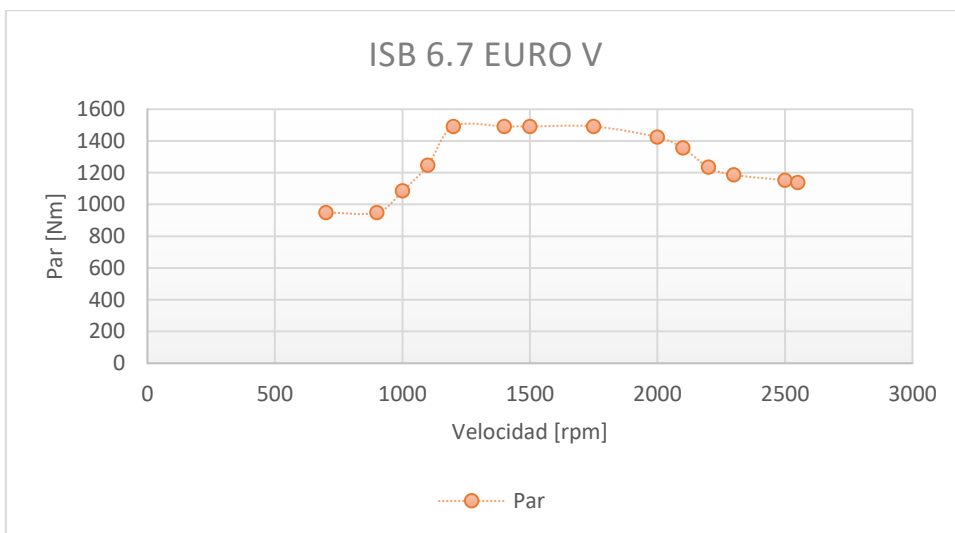
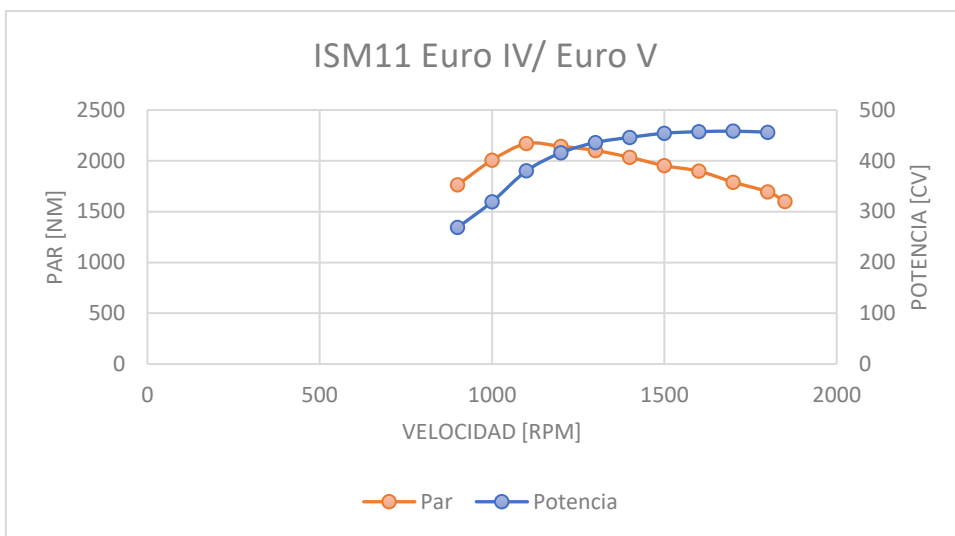
11. Fuentes de información

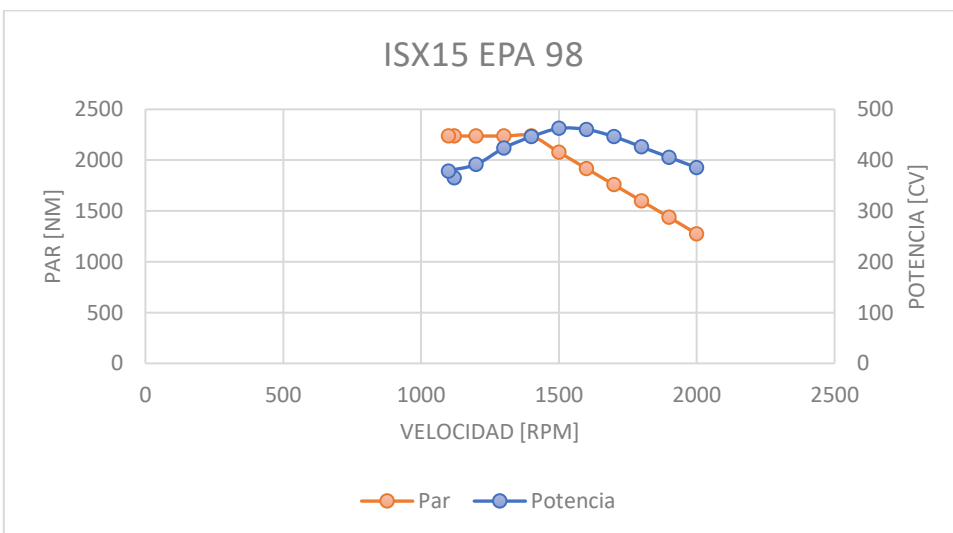
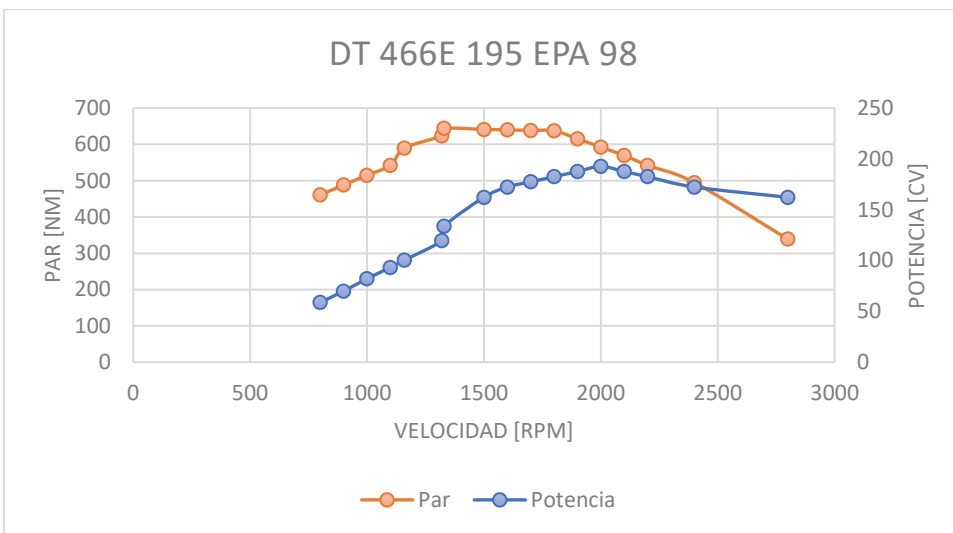
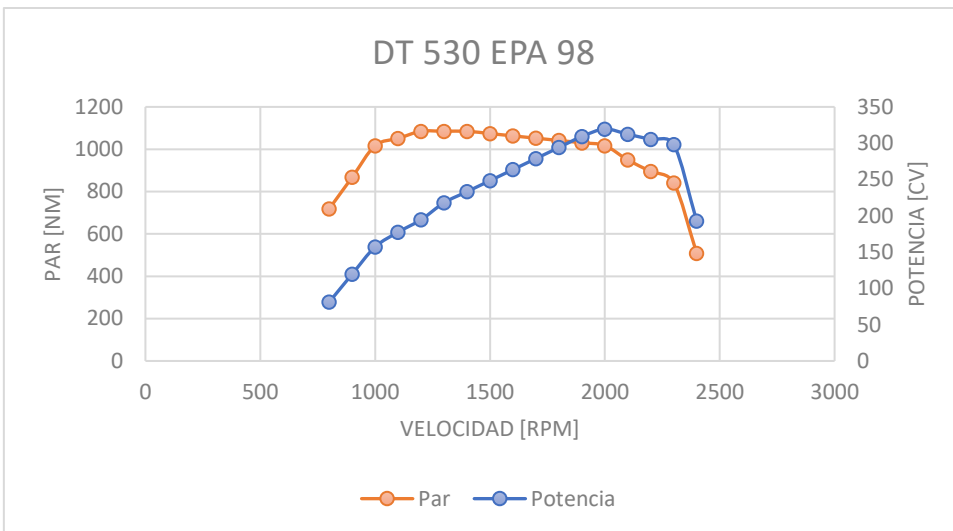
- [Adif] Adif, “Declaración sobre la Red”. Madrid. 2016
- [AEC] López Gomez, J. L., “El tren Talgo 250 híbrido”, visitado última vez 16/09/19:
<<http://www.aecientificos.es/escaparate/verpagina.cgi?idpagina=20637519>>
- [Cerezo] Cerezo Toledo, J., “Diseño de un eje motor ferroviario”. Leganés, Universidad Carlos III de Madrid. 2015
- [Máquinas] Apuntes de la asignatura Máquinas eléctricas del Grado de ingeniería de tecnologías industriales, Universidad de Zaragoza. Zaragoza, 2014.
- [Ferropedia] Ferropedia, “Costos de construcción de infraestructura”, visitado última vez 17/09/19:
<<http://ferropedia.es/mediawiki/index.php/Portada>>
- [Garcia] García Álvarez, A., “Dinámica de los trenes de alta velocidad”, Fundación de los Ferrocarriles españoles. Madrid. 2006
- [Idae] Idae, “Análisis del recurso eólico. Atlas eólico de España. Estudio técnico PER 2011-2020”. Madrid. 2011
- [INTERNATIONAL] International Camiones, visitado última vez 17/09/19:
<<https://latin-america.internationalcamiones.com/>>
- [Larrodé] Larrodé Pellicer, E., “Ferrocarriles y tracción eléctrica”. Zaragoza : Copy Center, cop. 2016
- [NT Renfe] Renfe, Gerencia de Gestión de Capacidades, UN de Circulación, “Norma Técnica CGC 6 de determinación de las cargas máximas y rampas características”. Madrid. 2001
- [Movilidad] Apuntes de la asignatura Movilidad eléctrica del Grado de ingeniería de tecnologías industriales, Universidad de Zaragoza. Zaragoza, 2016.
- [OTLE] Ministerio de Fomento, Observatorio del Transporte y la Logística en España. 2016. Recuperado de:
<http://observatoriotransporte.fomento.es/BDOTLE/indicadores>
- [Plasser] Plasser & Theurer Ibérica, visitado última vez 17/09/19:
<<https://www.plasser.es/es/inicio/index.html>>
- [Renfe] Renfe, “Catálogo de vagones”. Madrid. 2015

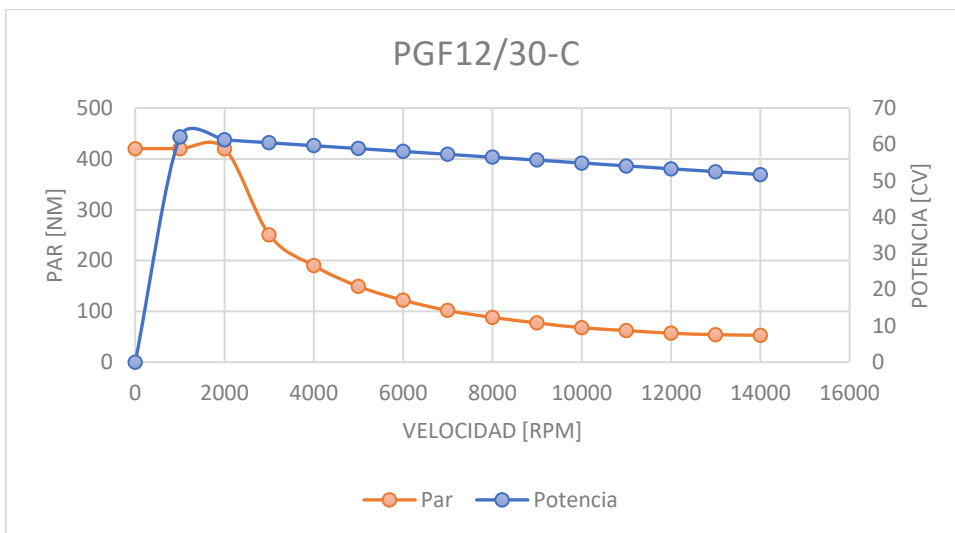
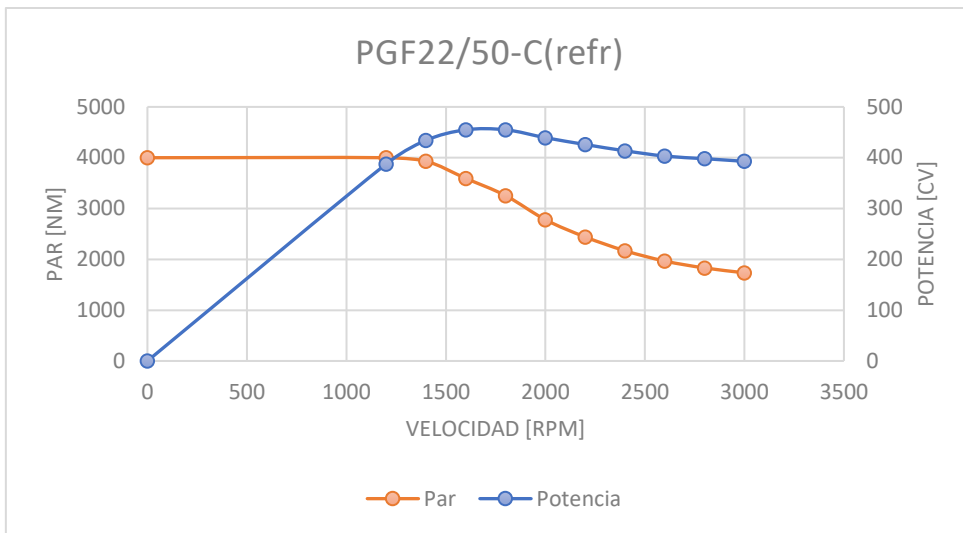
- [SPR] Self Prop Rail – self propelled rail carriages, visitado última vez 06/09/2019:
<<http://www.selfproprail.eu/>>
- [Suárez] Suárez Muñoz, J.R., “Aerodinámica de los vehículos ferroviarios”, Revista Carril, número 20, julio 1987. Barcelona
- [Thyssenkrupp] Thyssenkrupp, visitado última vez 17/09/2019:
<https://www.thyssenkrupp-rotheerde.com/technische_grundlagen_15_es>

Anexos

AI – Curvas características de los motores



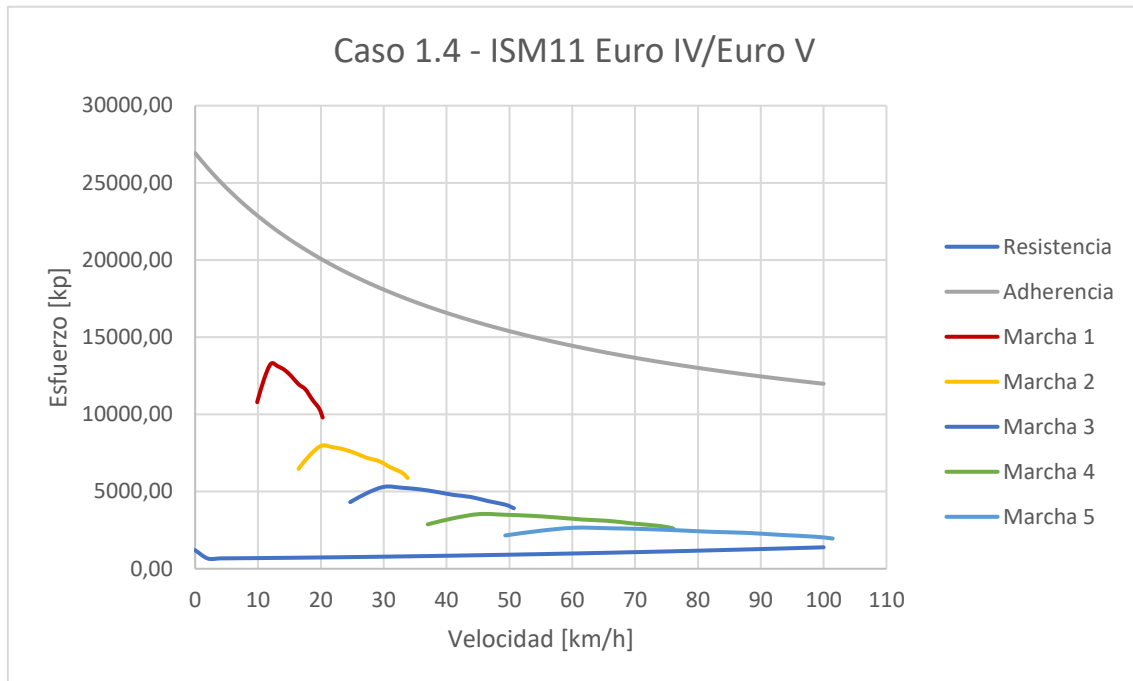




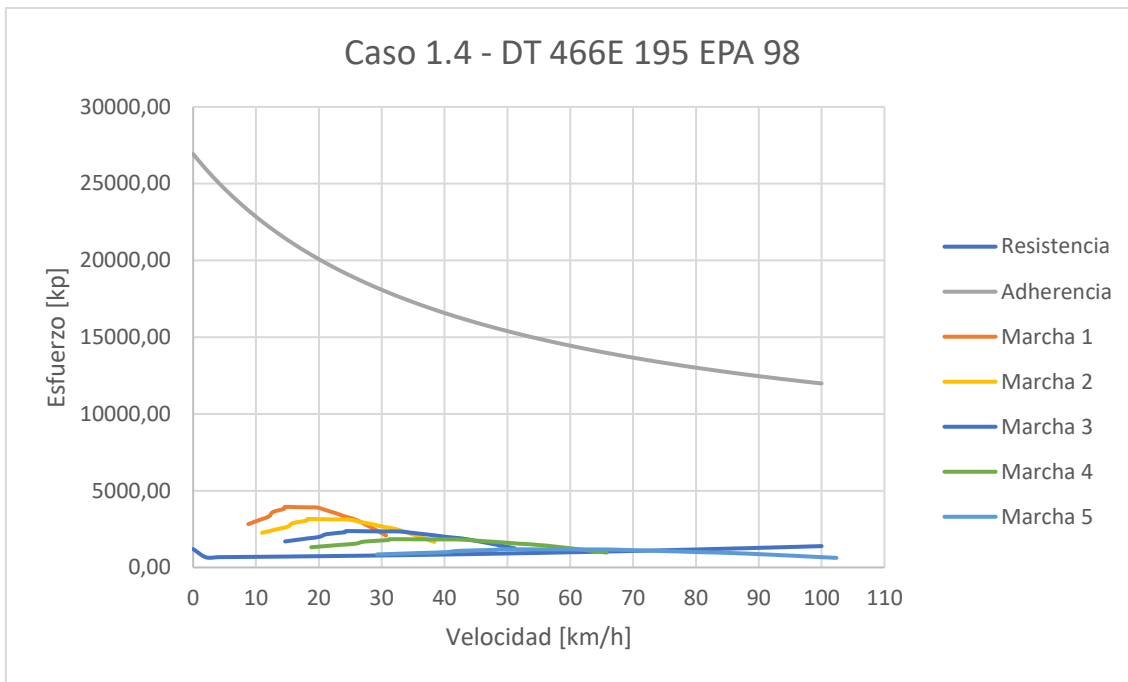
A II – Cálculos

Escenario 1

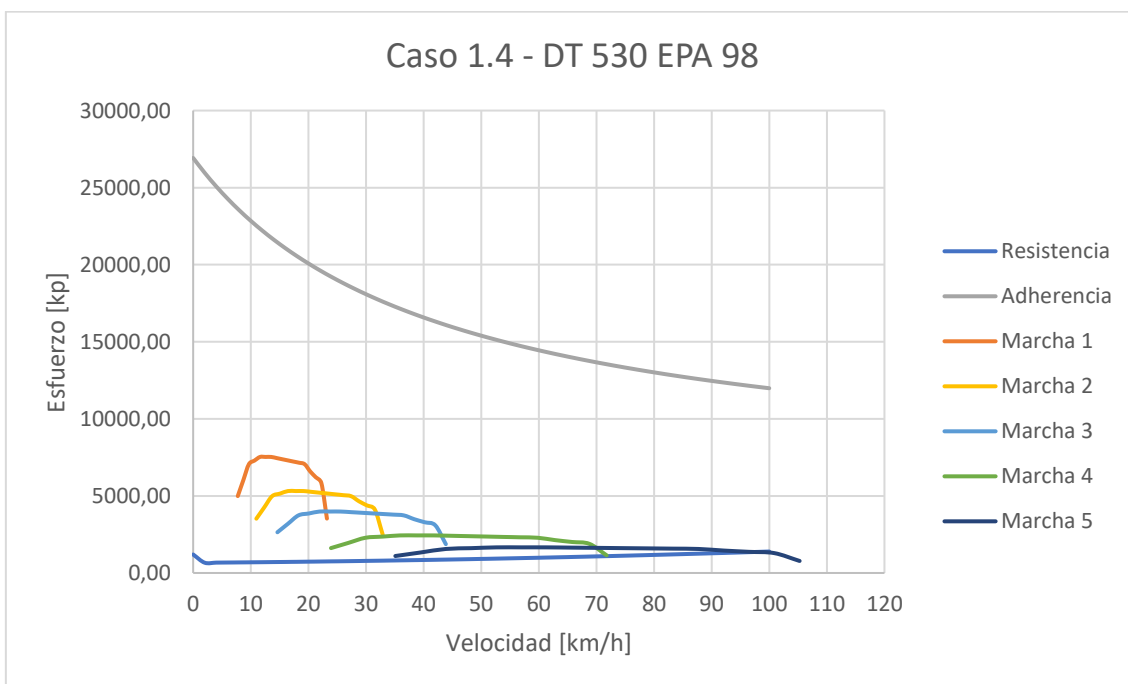
4 ejes



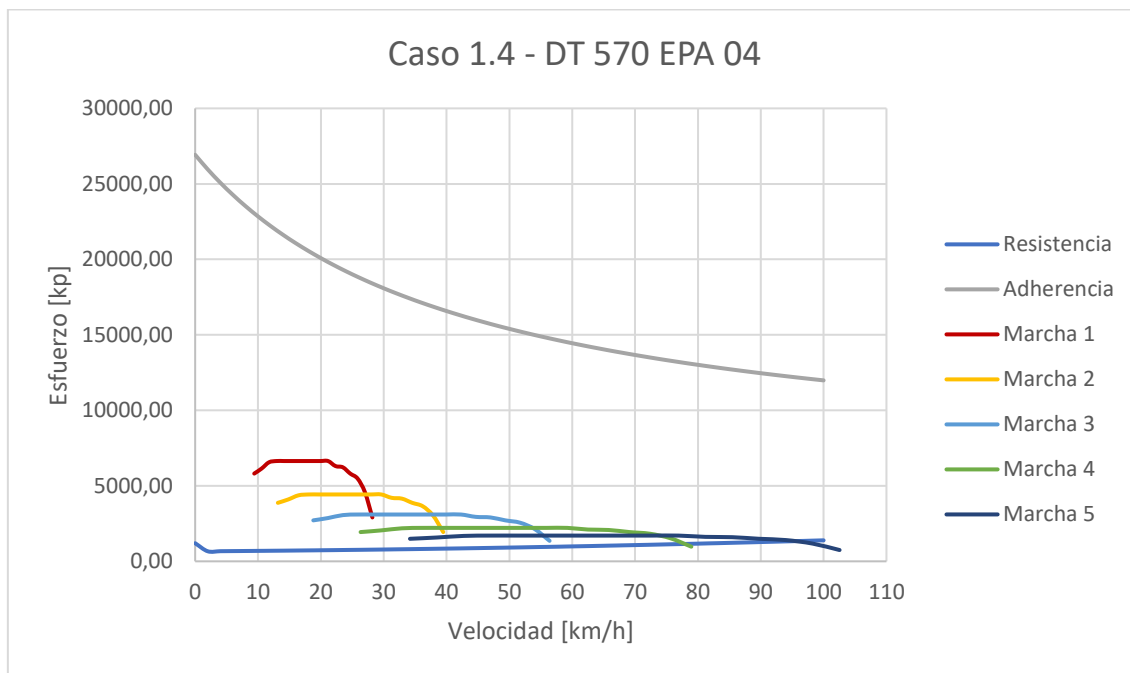
Marcha	i'
Marcha 1	30
Marcha 2	18
Marcha 3	12
Marcha 4	8
Marcha 5	6



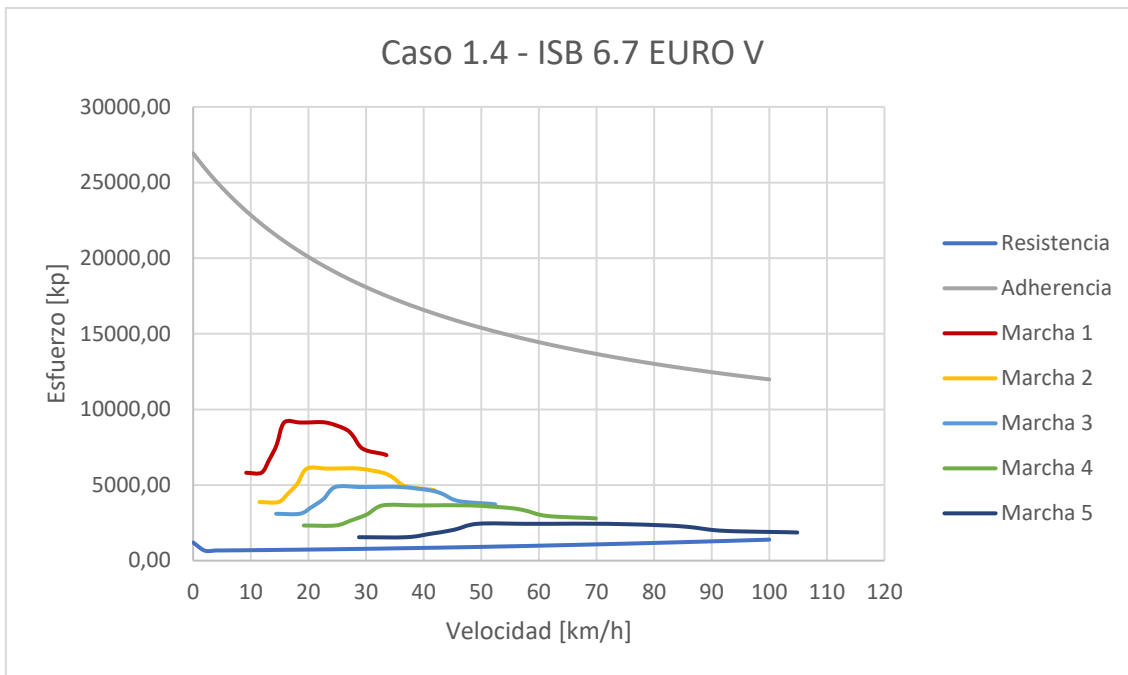
Marcha	i'
Marcha 1	30
Marcha 2	24
Marcha 3	18
Marcha 4	14
Marcha 5	9



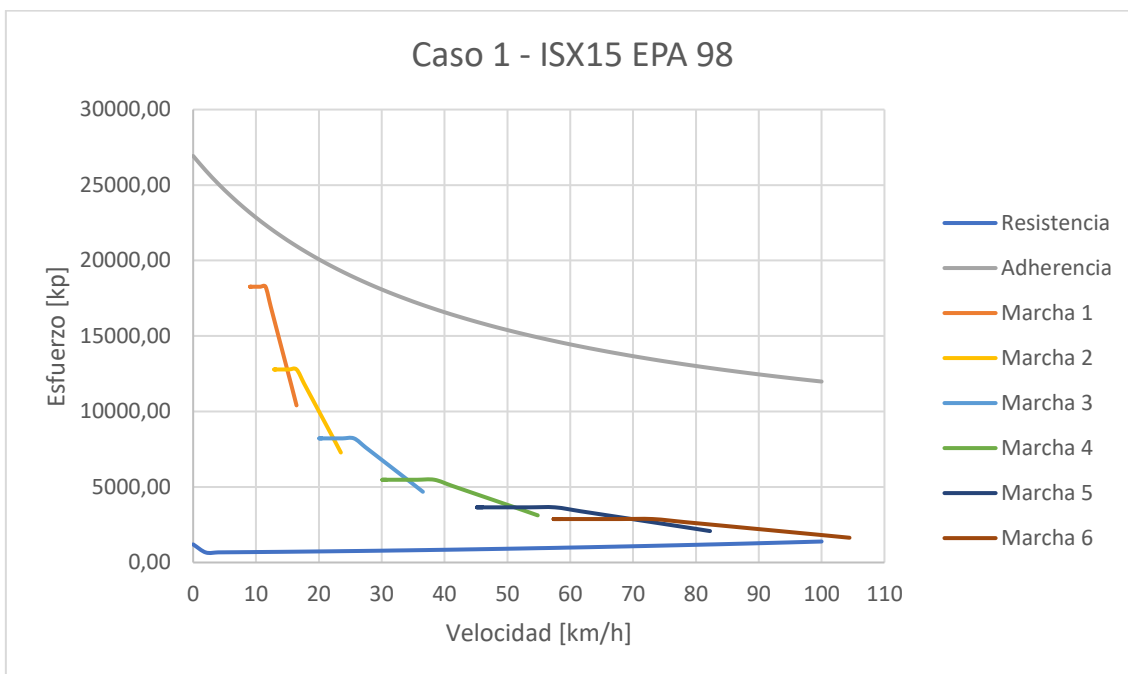
Marcha	i'
Marcha 1	34
Marcha 2	24
Marcha 3	18
Marcha 4	11
Marcha 5	7,5



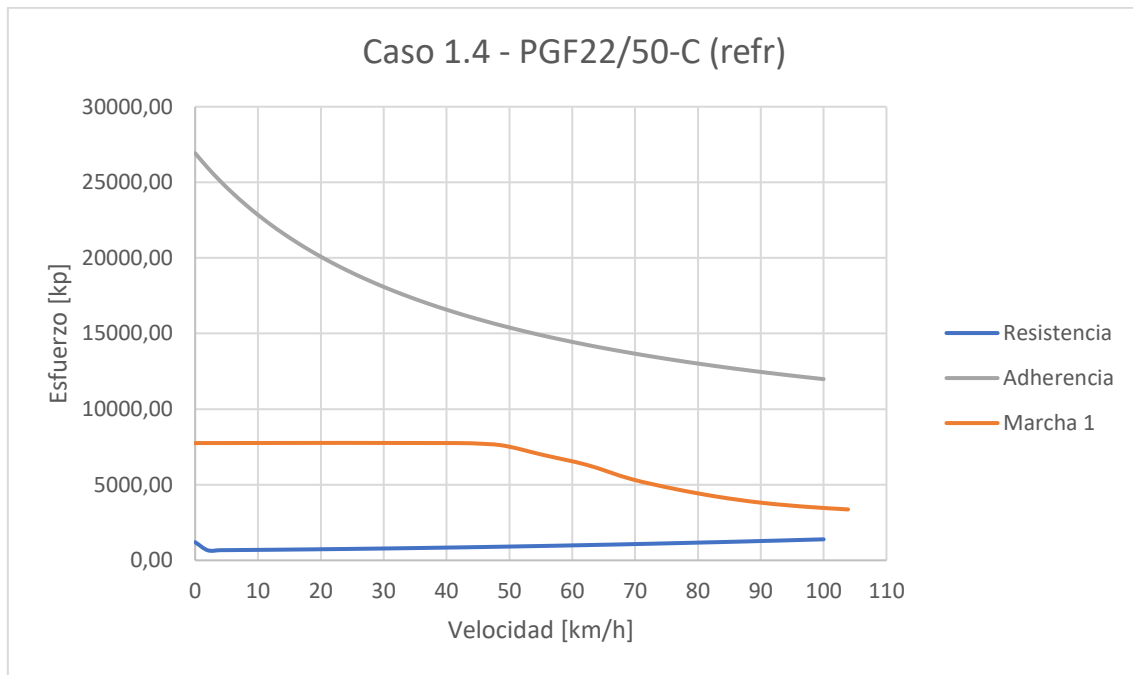
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	20
Marcha 3	14
Marcha 4	10
Marcha 5	7,7



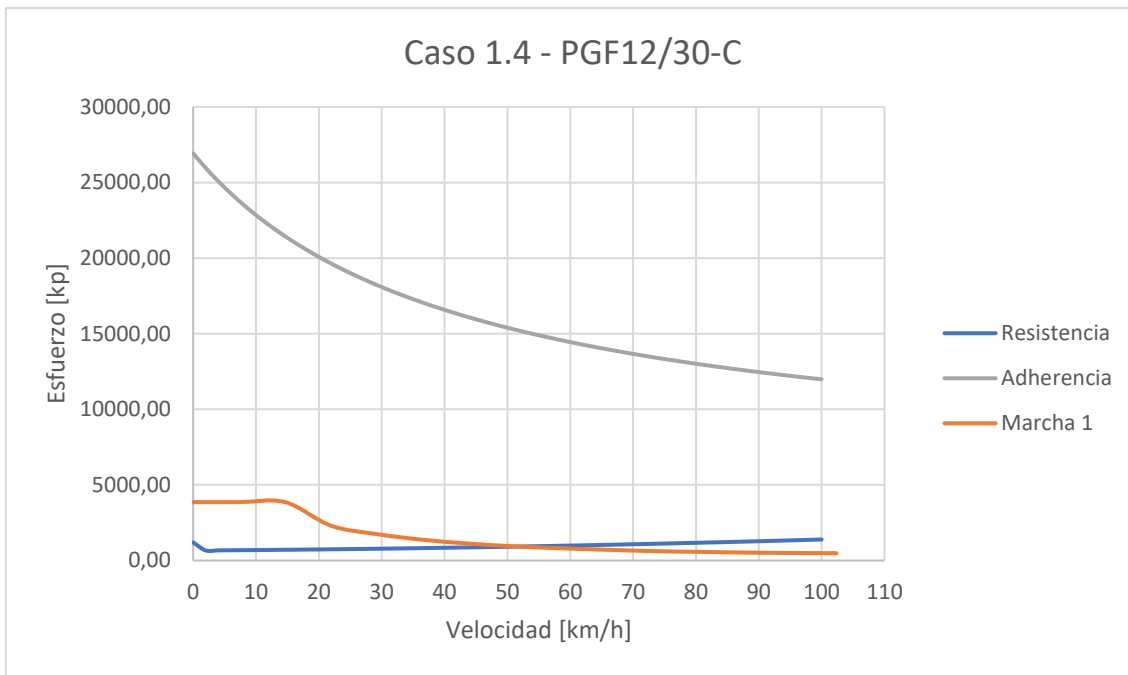
Marcha	i'
Marcha 1	25
Marcha 2	20
Marcha 3	16
Marcha 4	12
Marcha 5	8



Marcha	i'
Marcha 1	40
Marcha 2	28
Marcha 3	18
Marcha 4	12
Marcha 5	8
Marcha 6	6,3

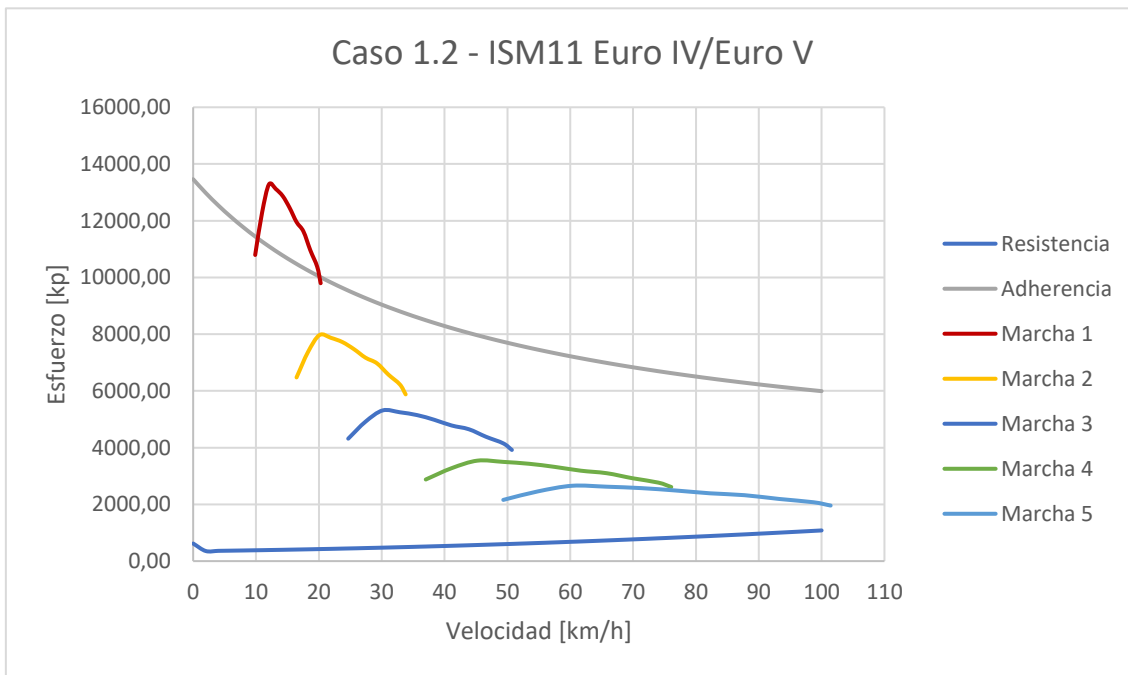


Marcha	i'
Marcha 1	9,5

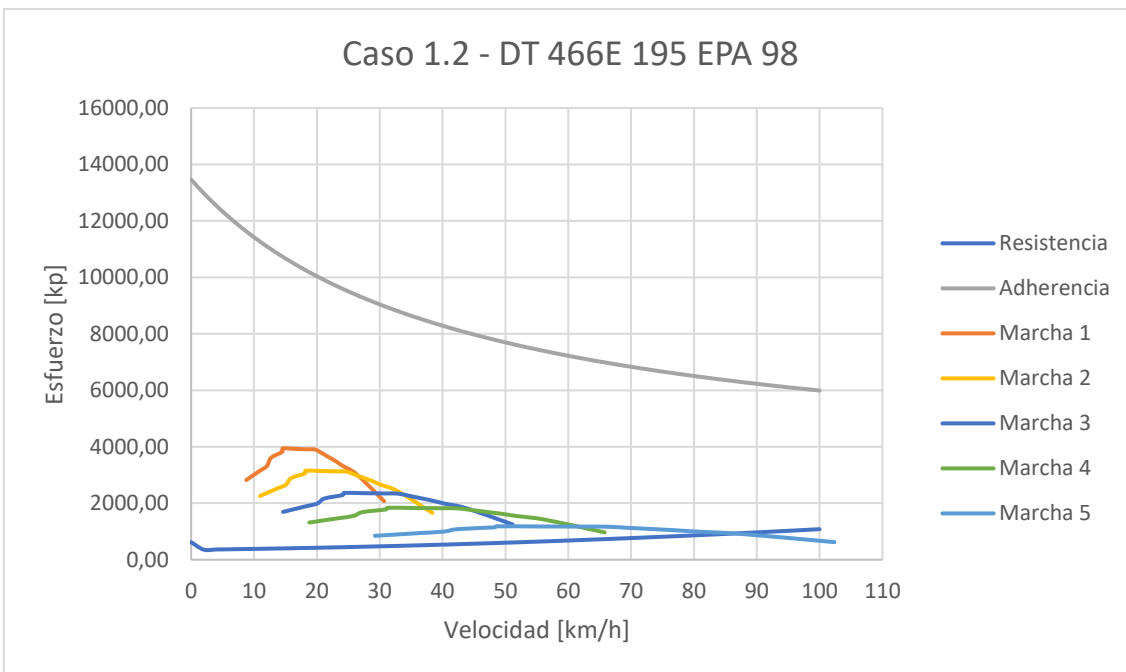


Marcha	i'
Marcha 1	45

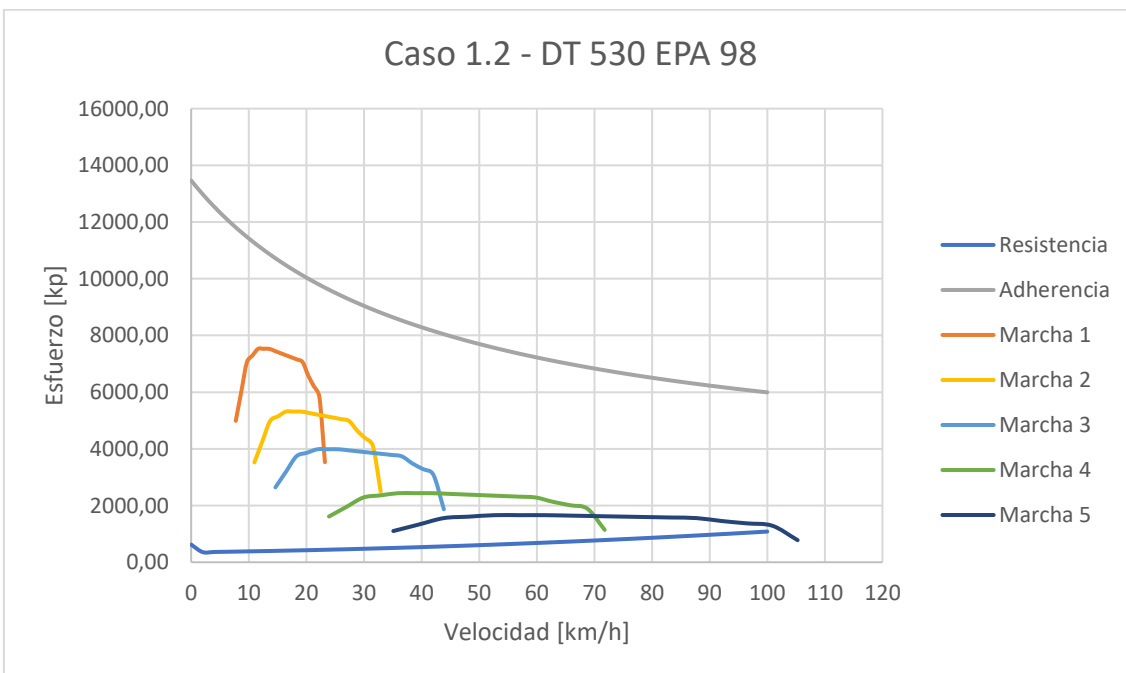
2 ejes



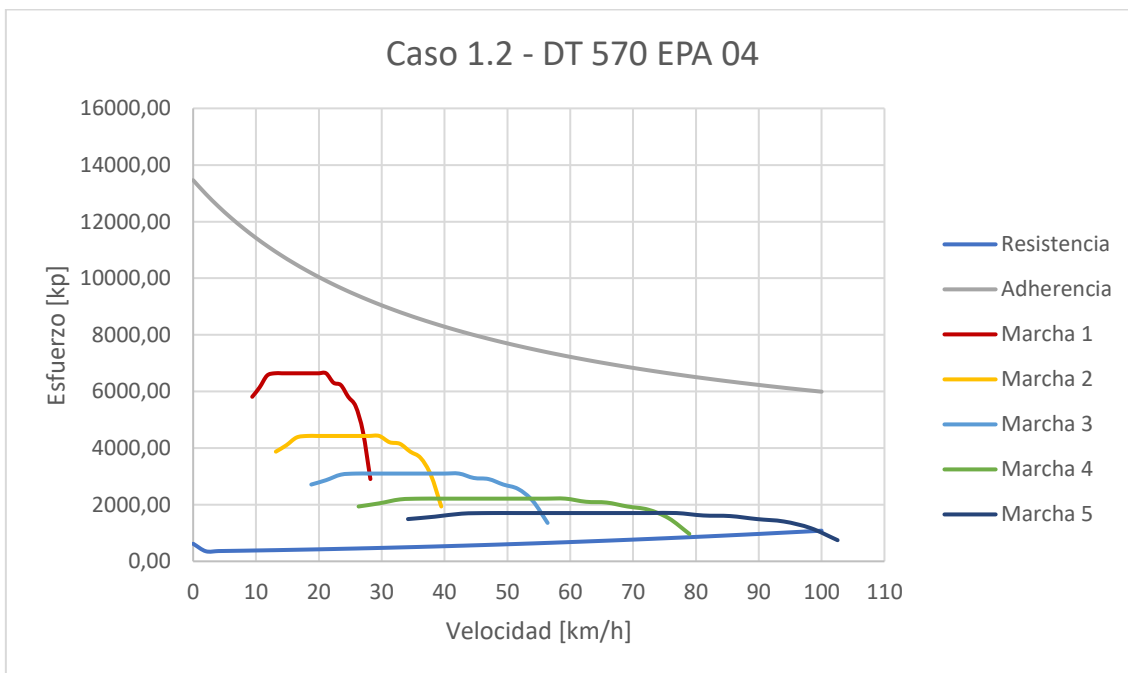
Marcha	i'
Marcha 1	30
Marcha 2	18
Marcha 3	12
Marcha 4	8
Marcha 5	6



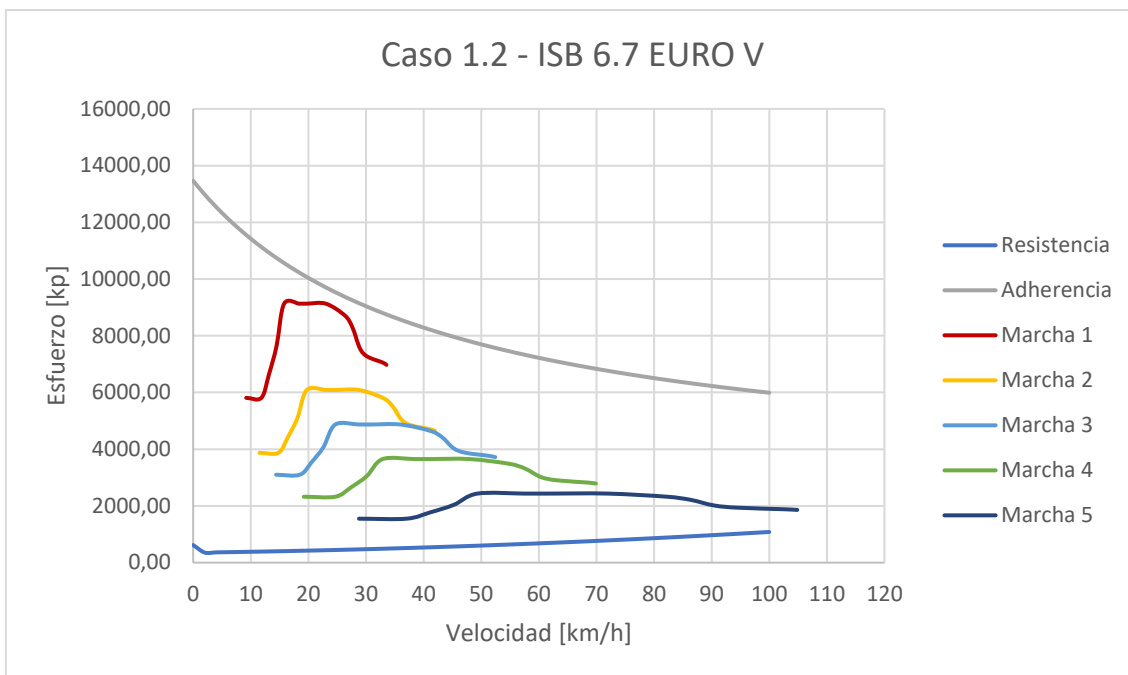
Marcha	i'
Marcha 1	30
Marcha 2	24
Marcha 3	18
Marcha 4	14
Marcha 5	9



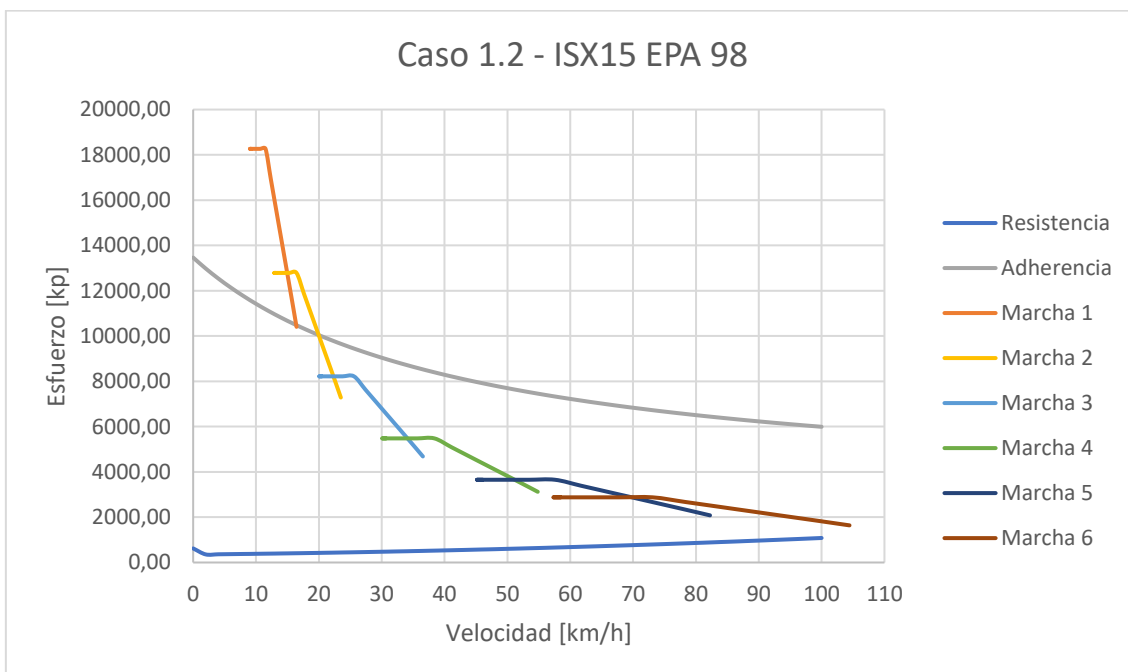
Marcha	i'
Marcha 1	34
Marcha 2	24
Marcha 3	18
Marcha 4	11
Marcha 5	7,5



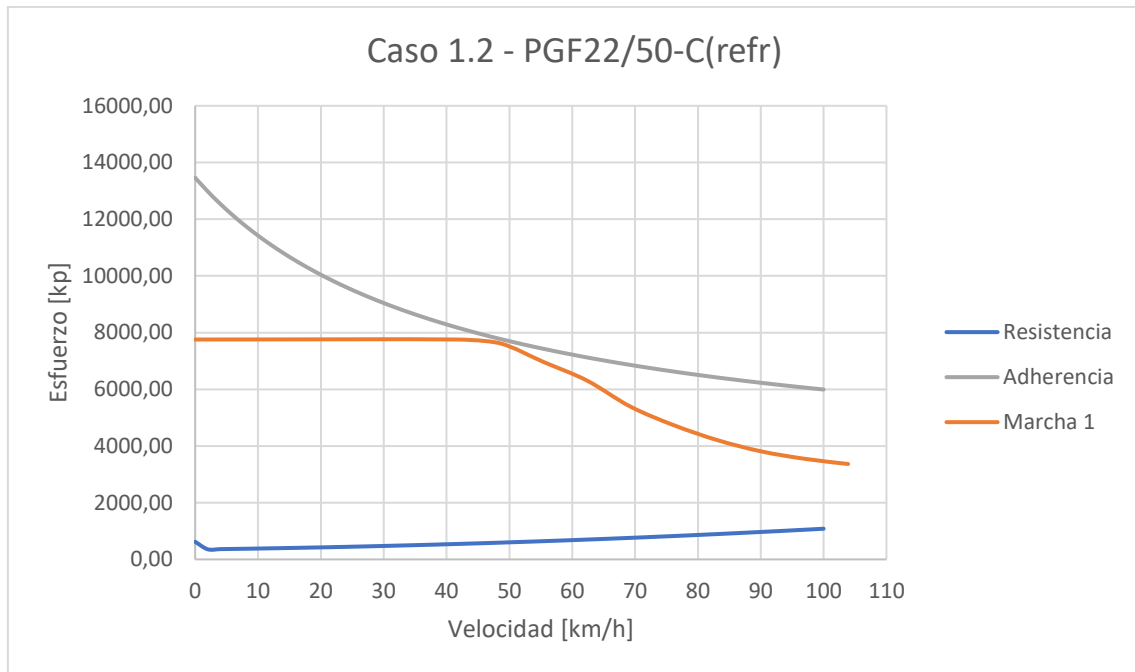
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	20
Marcha 3	14
Marcha 4	10
Marcha 5	7,7



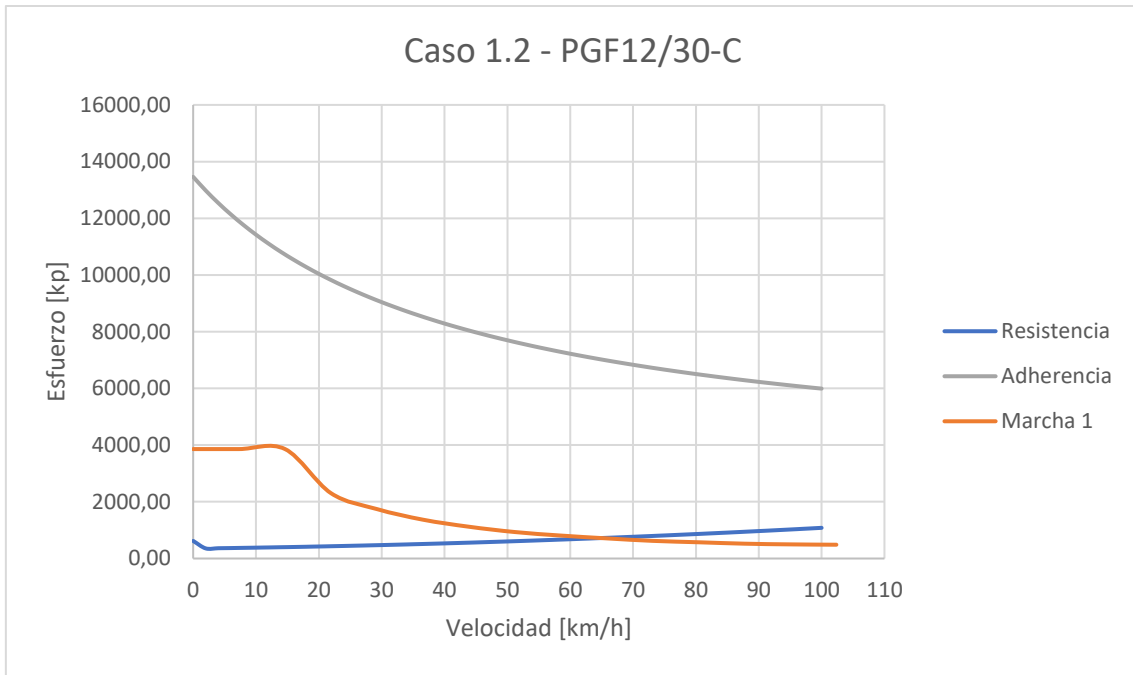
Marcha	i'
Marcha 1	25
Marcha 2	20
Marcha 3	16
Marcha 4	12
Marcha 5	8



Marcha	i'
Marcha 1	40
Marcha 2	28
Marcha 3	18
Marcha 4	12
Marcha 5	8
Marcha 6	6,3



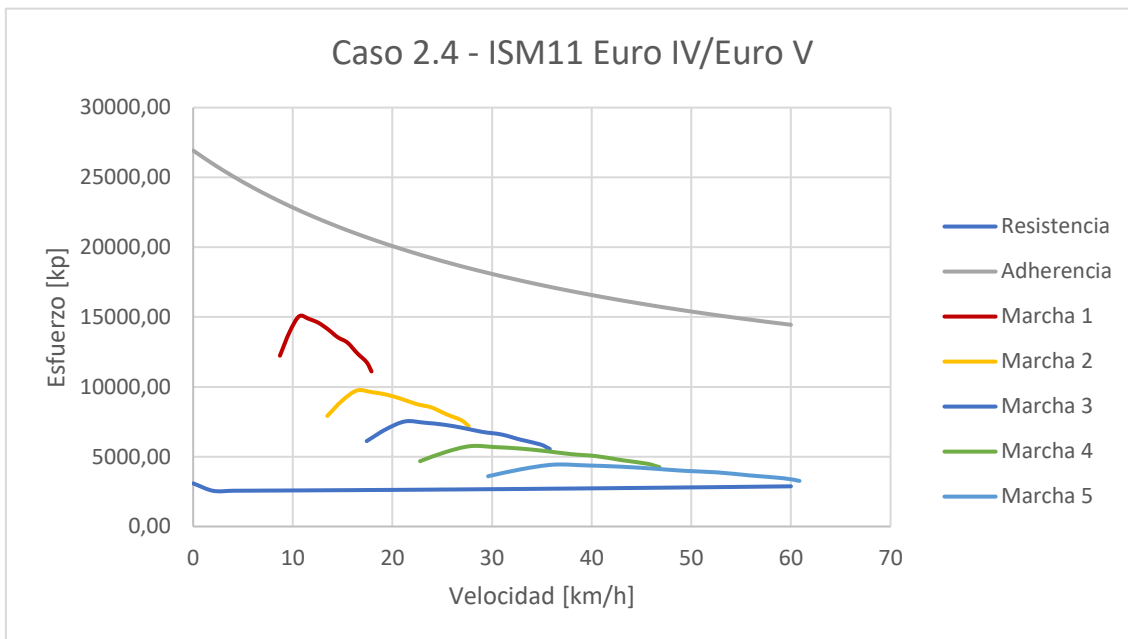
Marcha	i'
Marcha 1	9,5



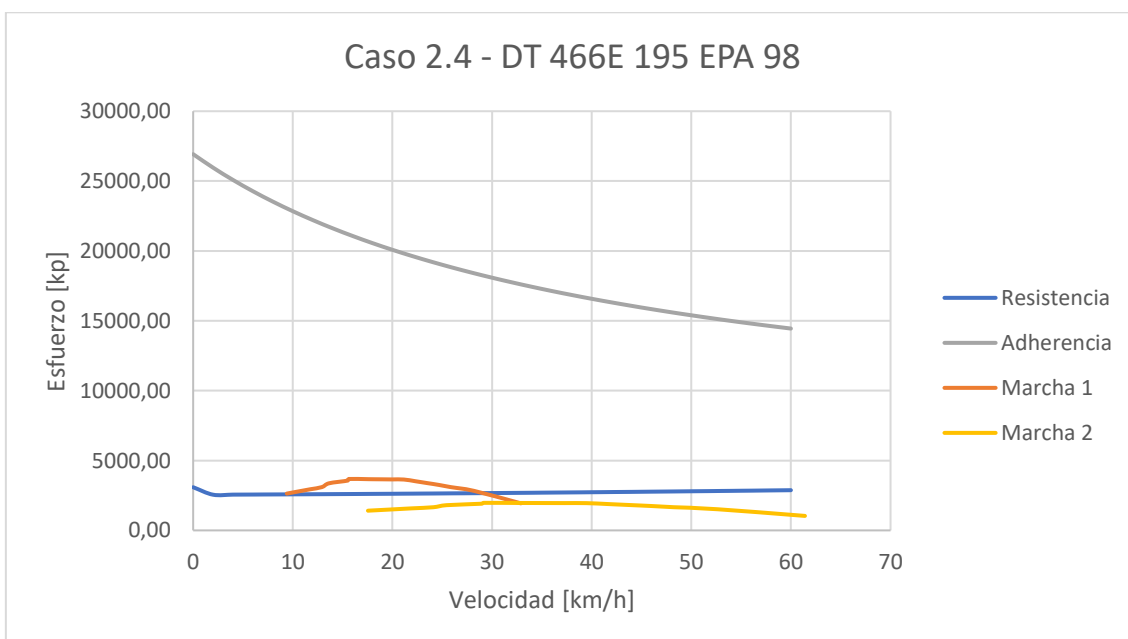
Marcha	i'
Marcha 1	45

Escenario 2

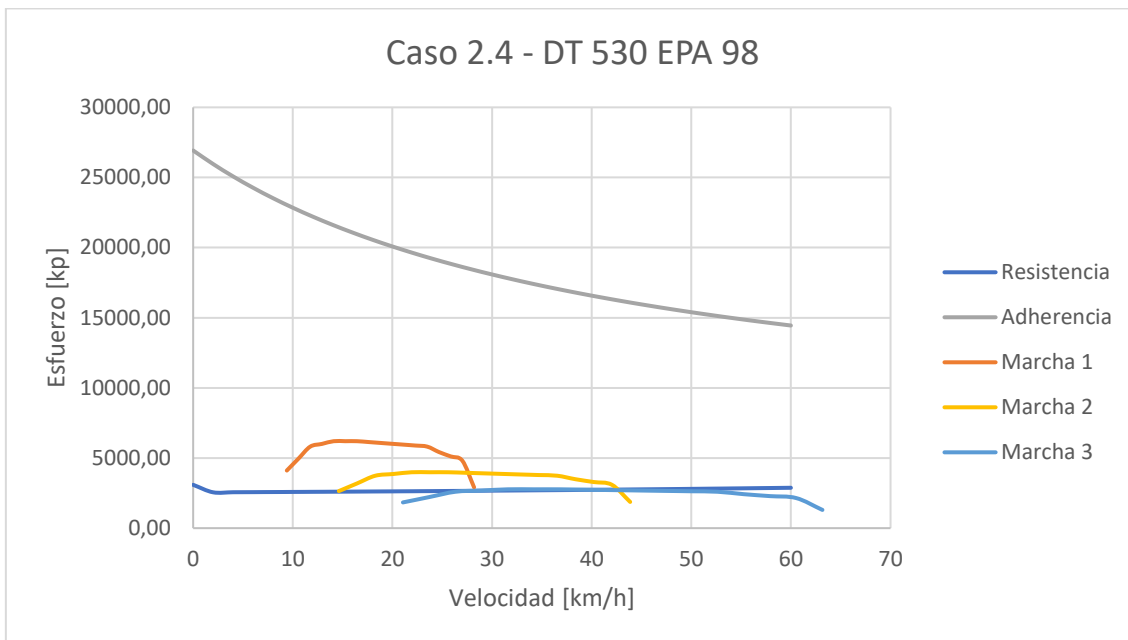
4 ejes



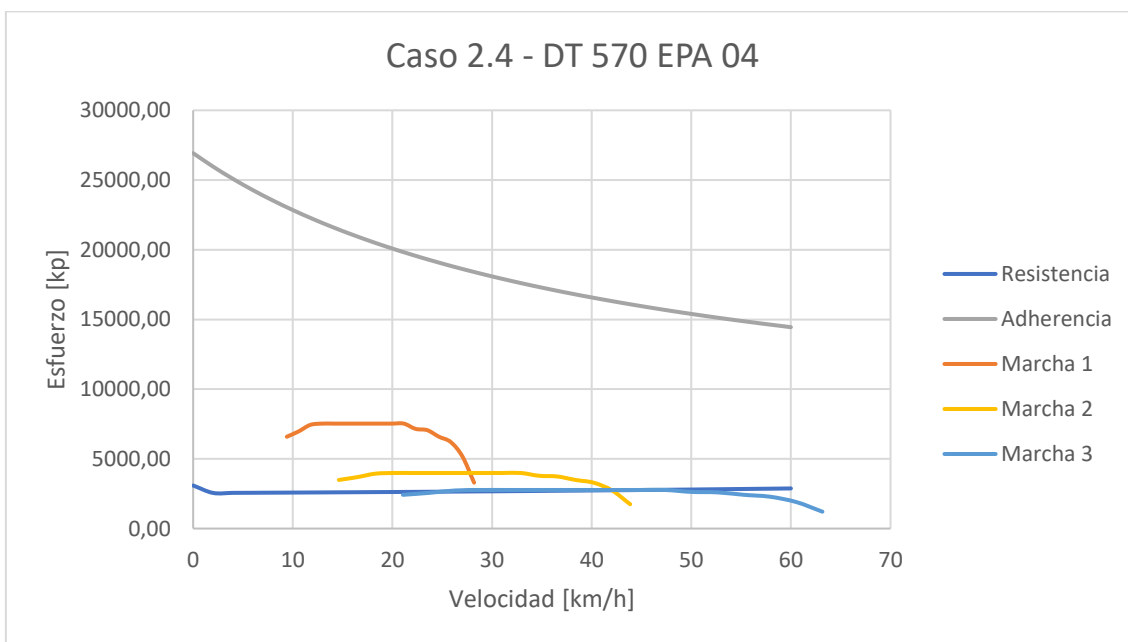
Marcha	i'
Marcha 1	34
Marcha 2	22
Marcha 3	17
Marcha 4	13
Marcha 5	10



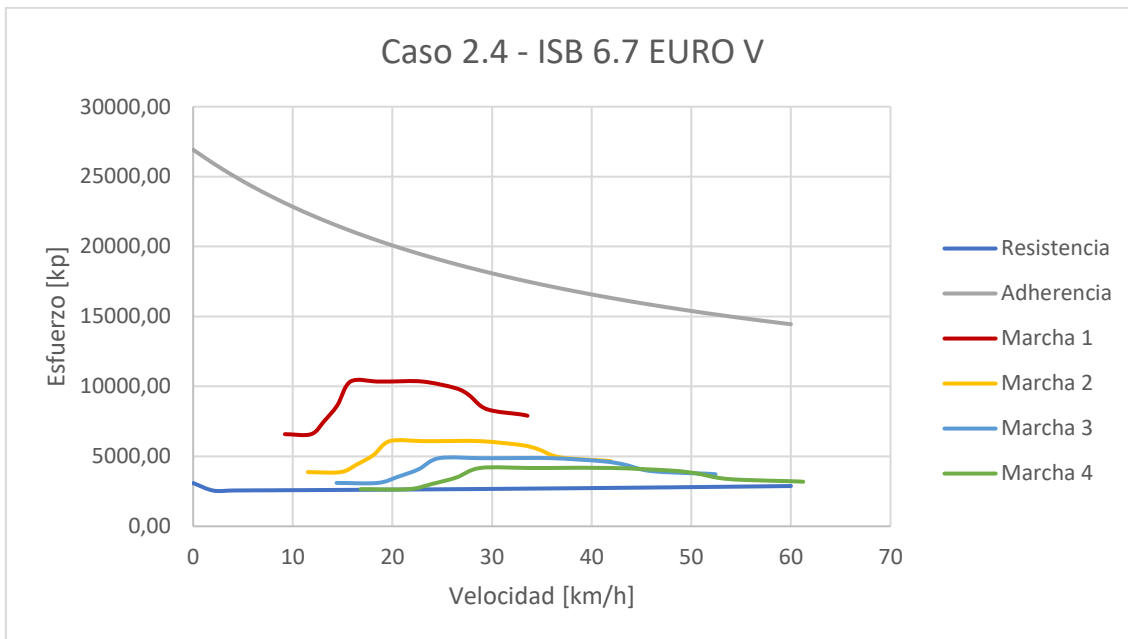
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	15



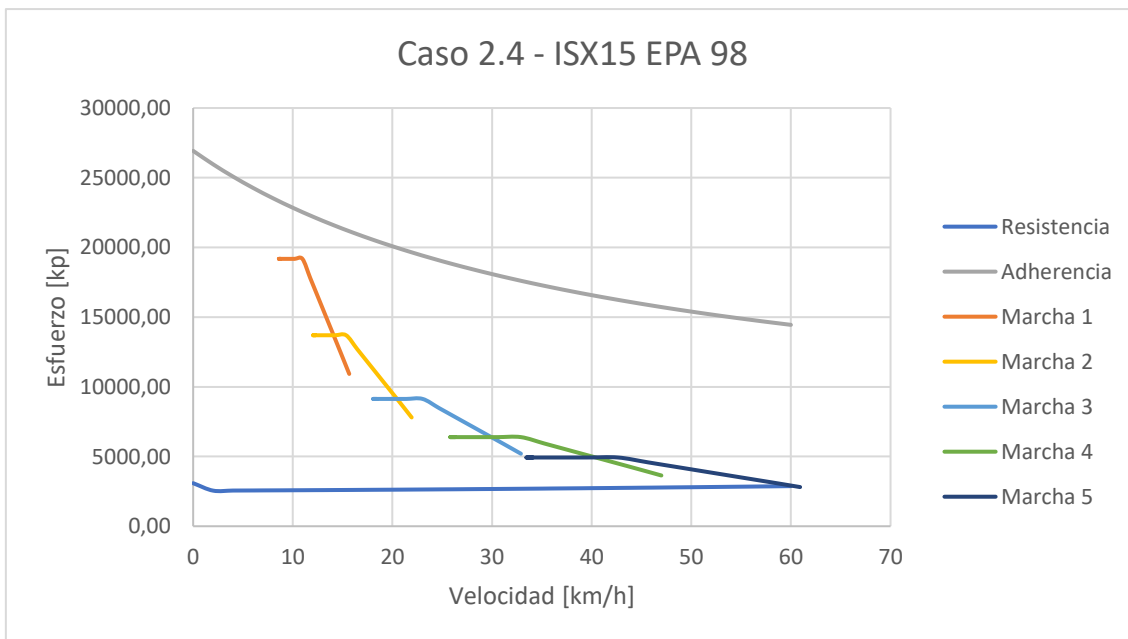
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	18
Marcha 3	12,5



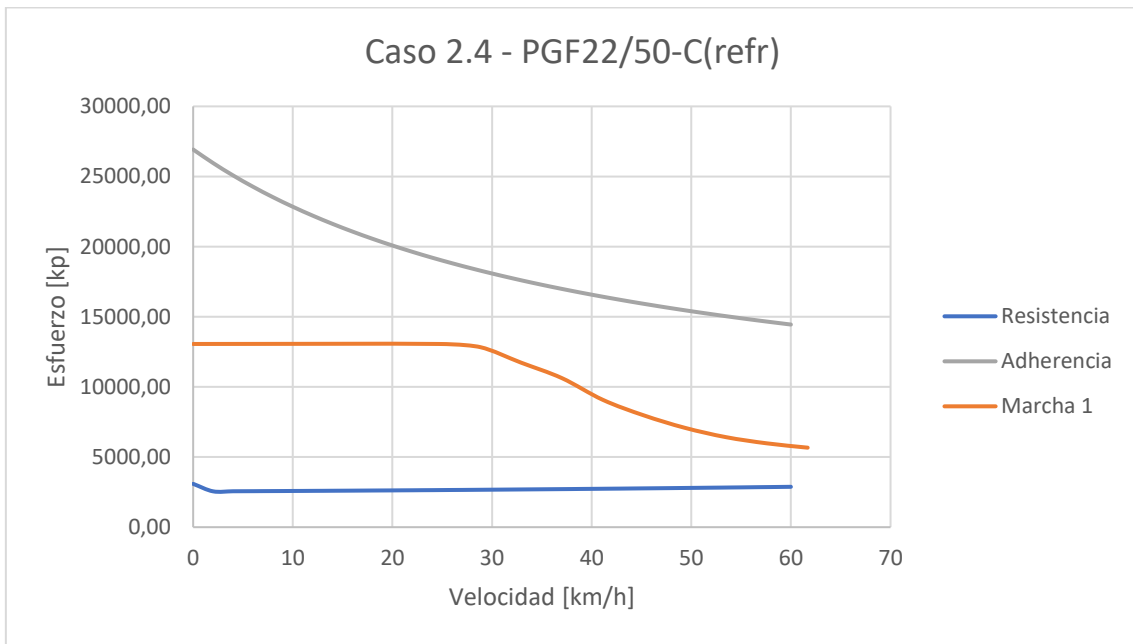
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	18
Marcha 3	12,5



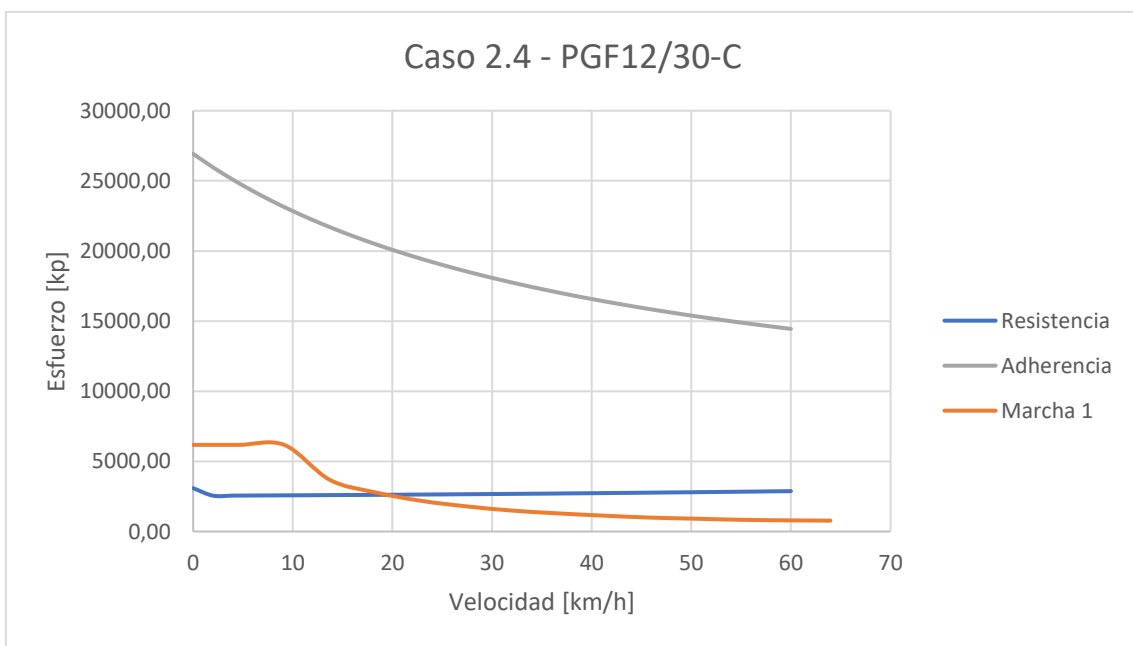
Marcha	i'
Marcha 1	25
Marcha 2	20
Marcha 3	16
Marcha 4	13,7



Marcha	i'
Marcha 1	42
Marcha 2	30
Marcha 3	20
Marcha 4	14
Marcha 5	10,8

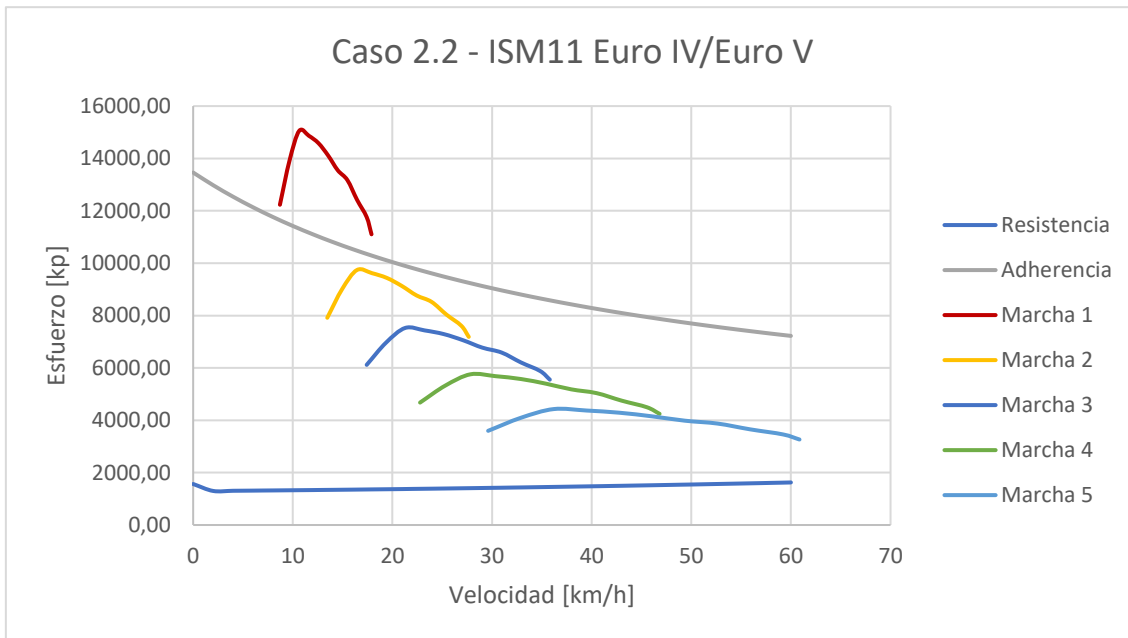


Marcha	i'
Marcha 1	16

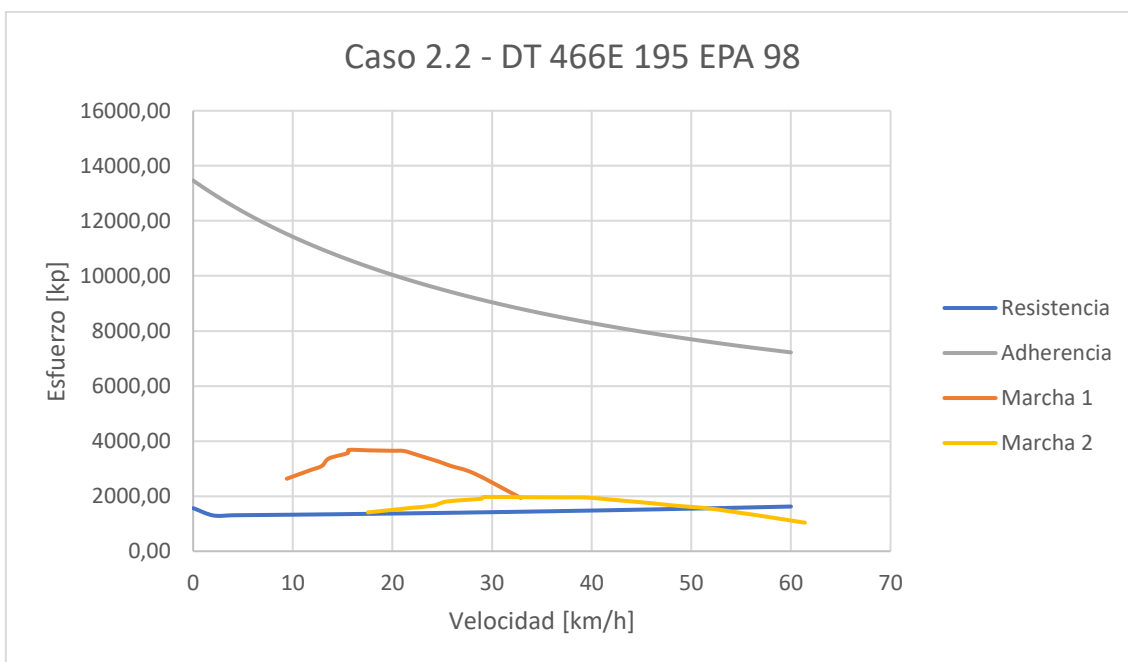


Marcha	i'
Marcha 1	72

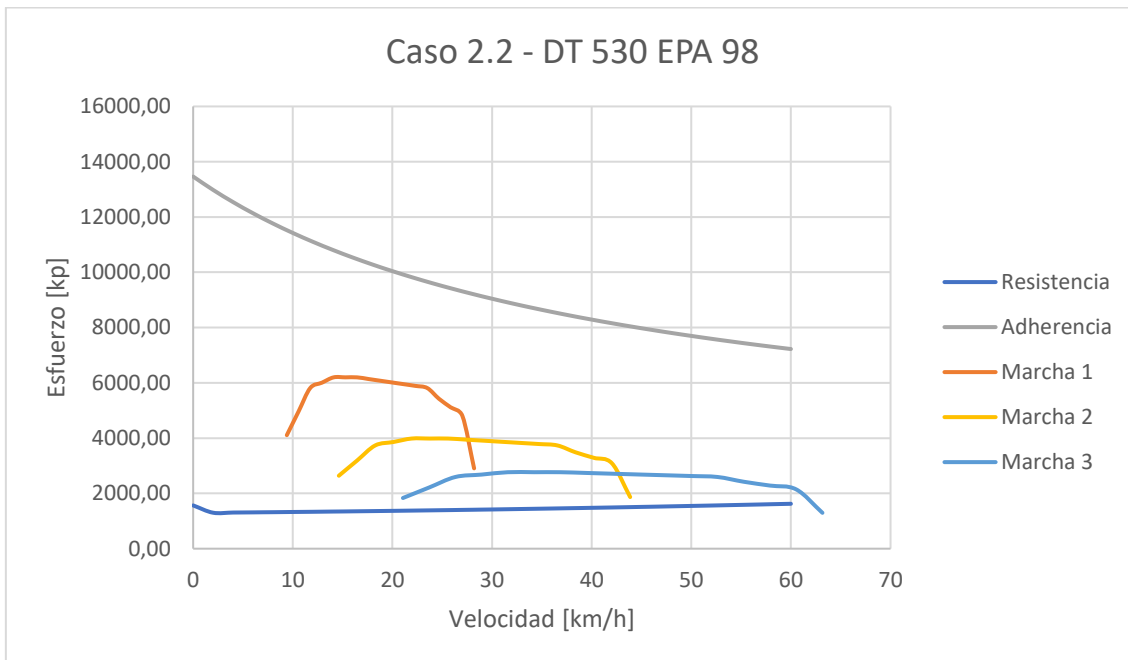
2 ejes



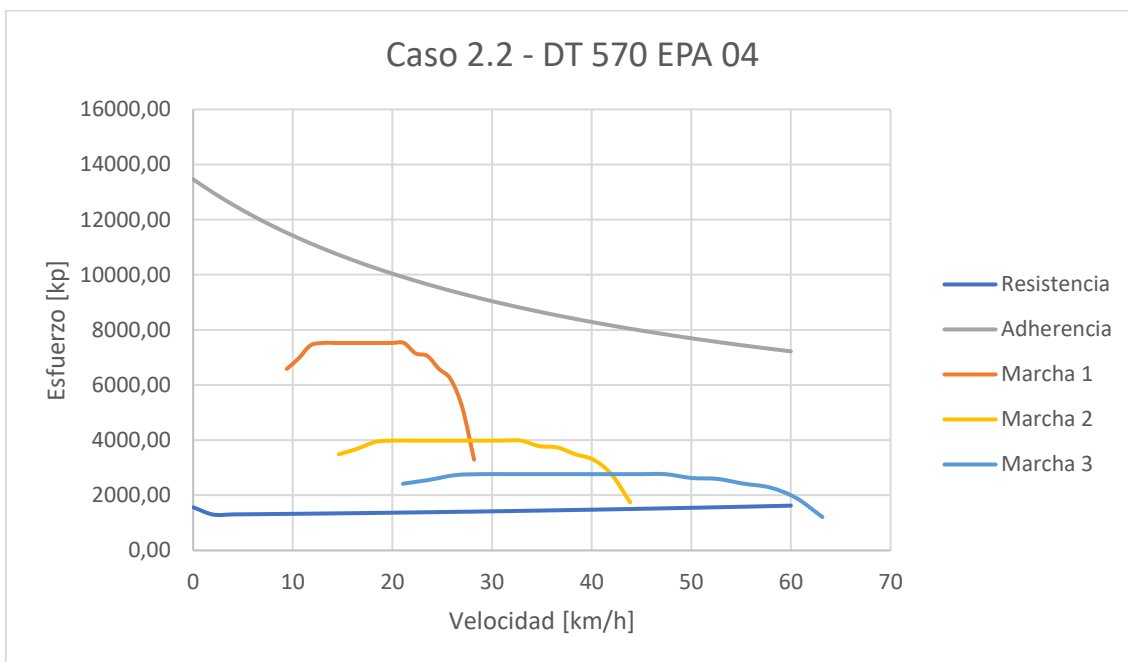
Marcha	i'
Marcha 1	34
Marcha 2	22
Marcha 3	17
Marcha 4	13
Marcha 5	10



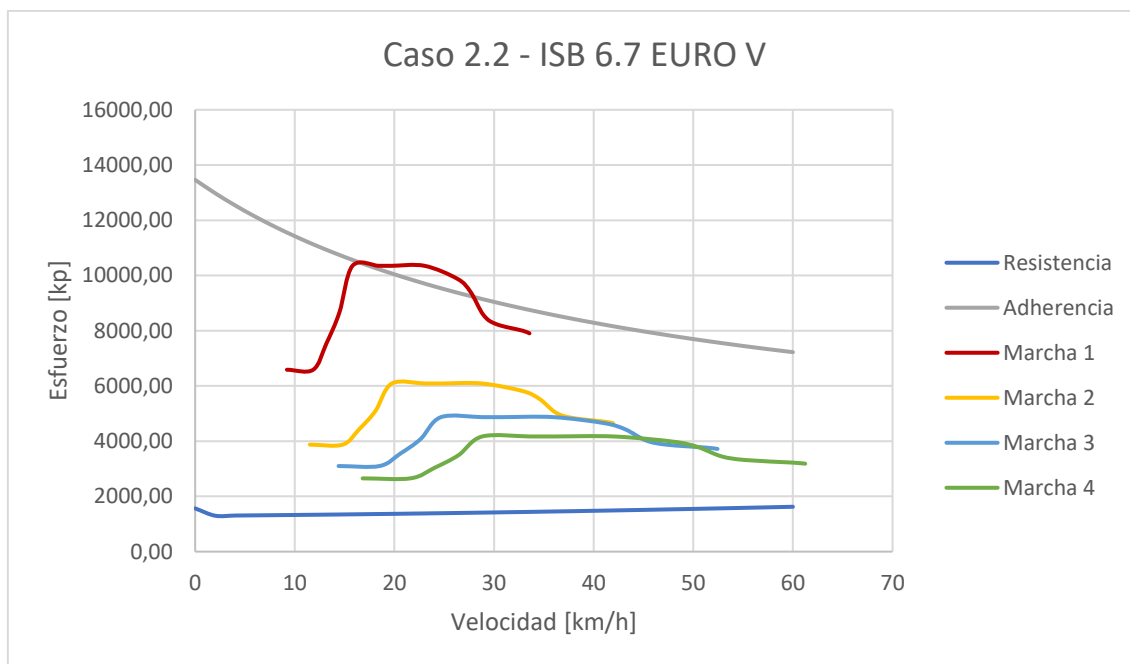
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	15



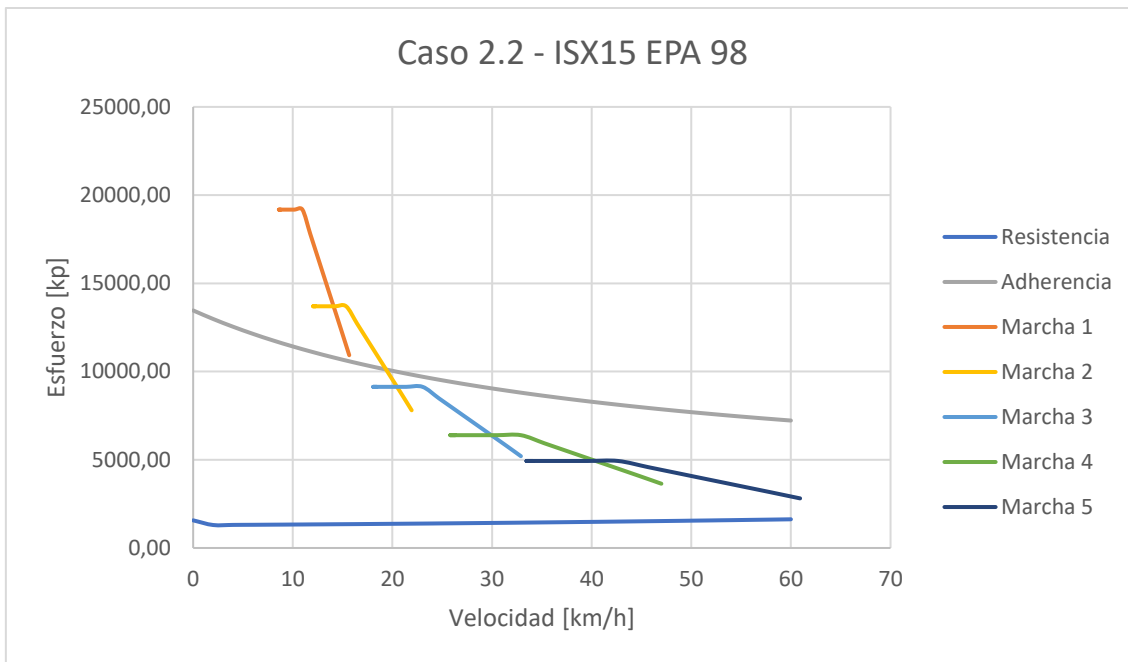
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	18
Marcha 3	12,5



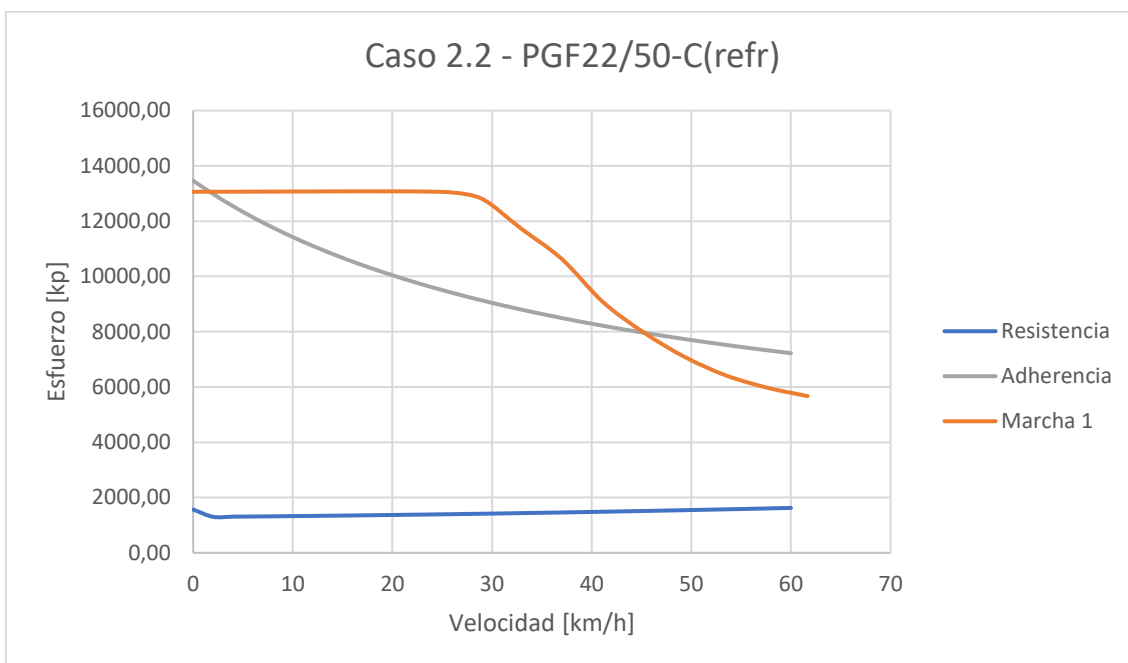
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	18
Marcha 3	12,5



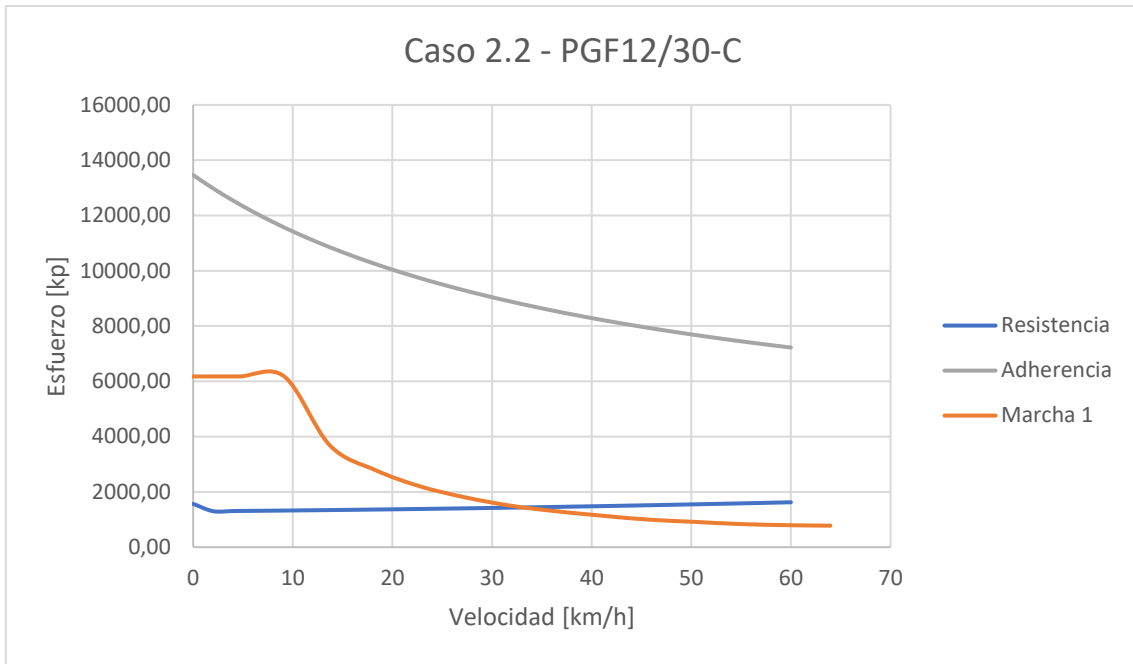
Marcha	i'
Marcha 1	25
Marcha 2	20
Marcha 3	16
Marcha 4	13,7



Marcha	i'
Marcha 1	42
Marcha 2	30
Marcha 3	20
Marcha 4	14
Marcha 5	10,8



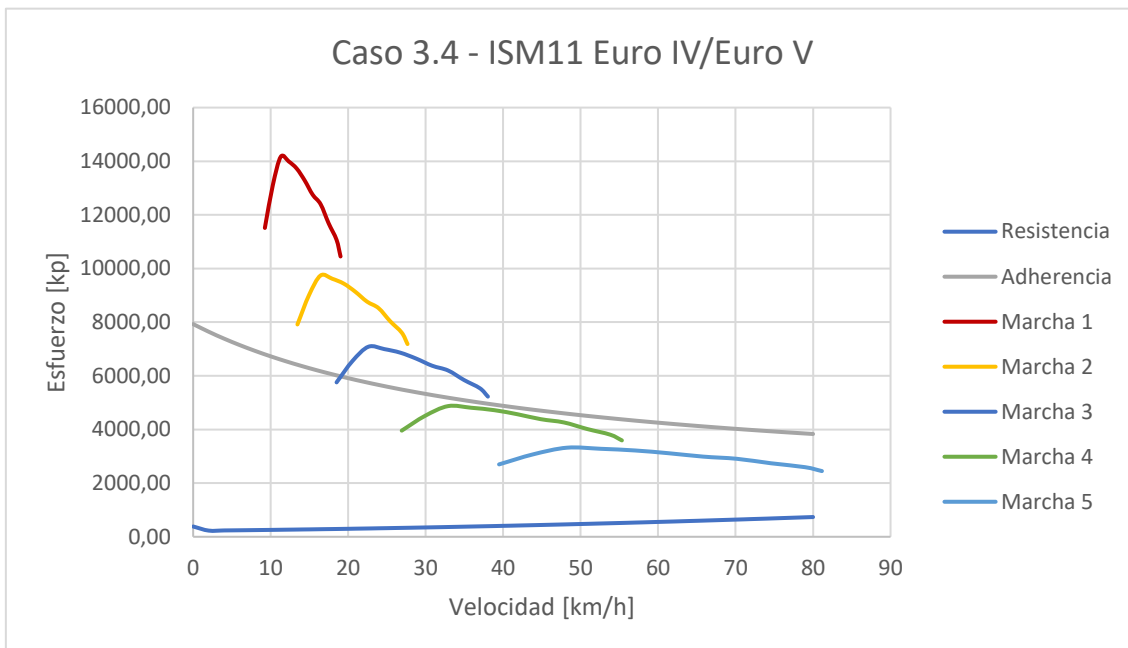
Marcha	i'
Marcha 1	16



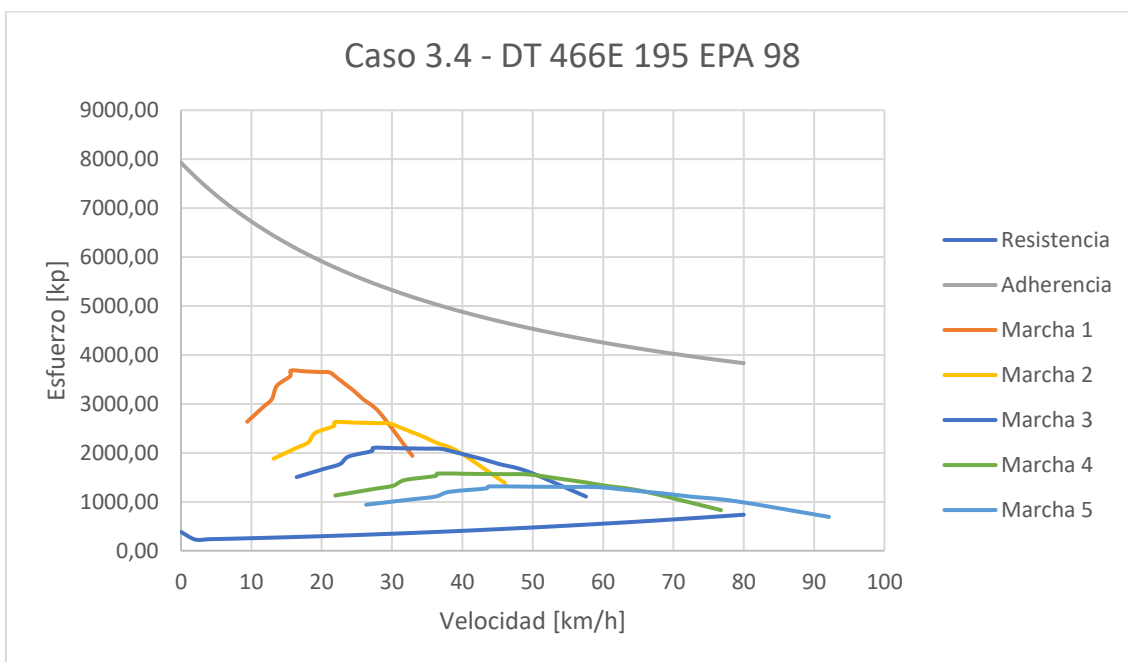
Marcha	i'
Marcha 1	72

Escenario 3

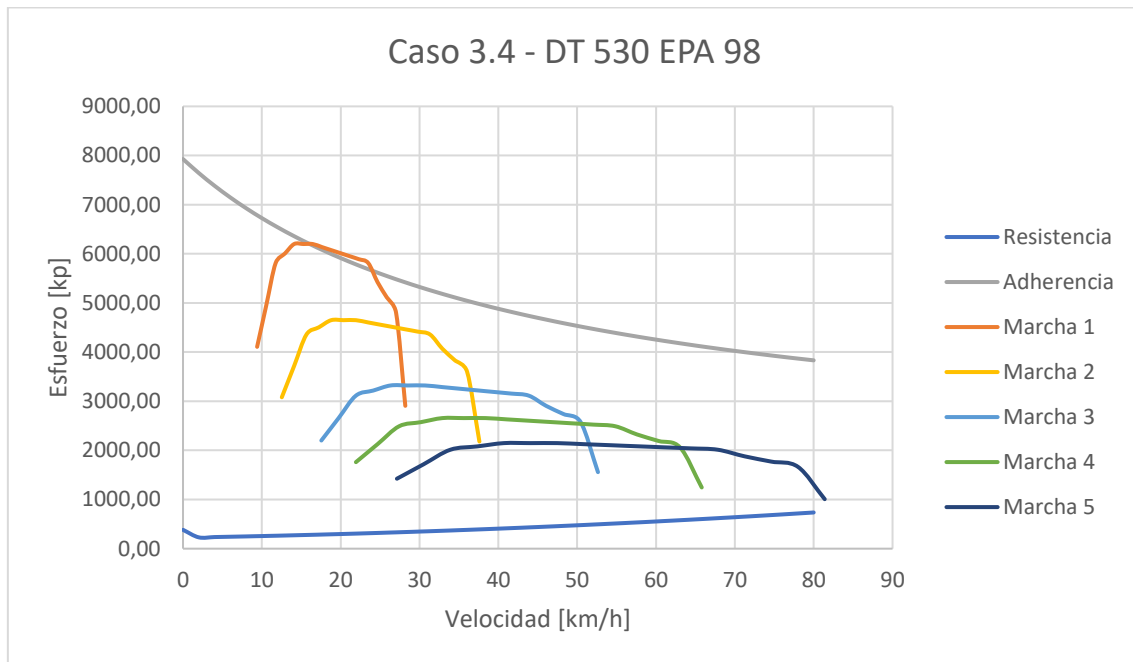
4 ejes



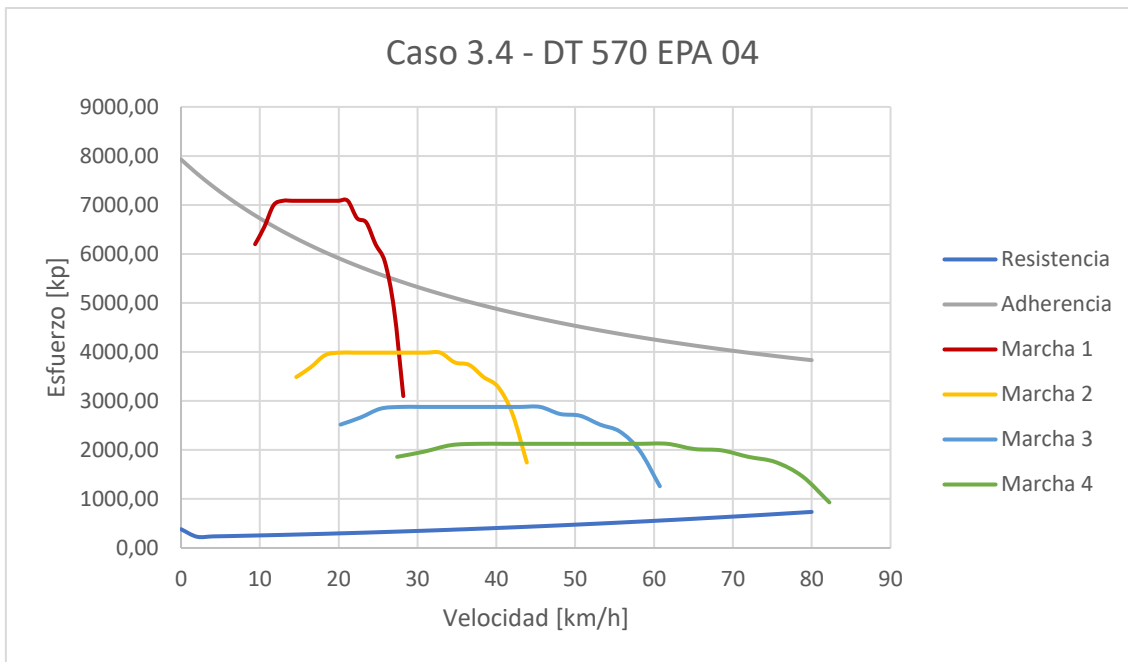
Marcha	i'
Marcha 1	32
Marcha 2	22
Marcha 3	16
Marcha 4	11
Marcha 5	7,5



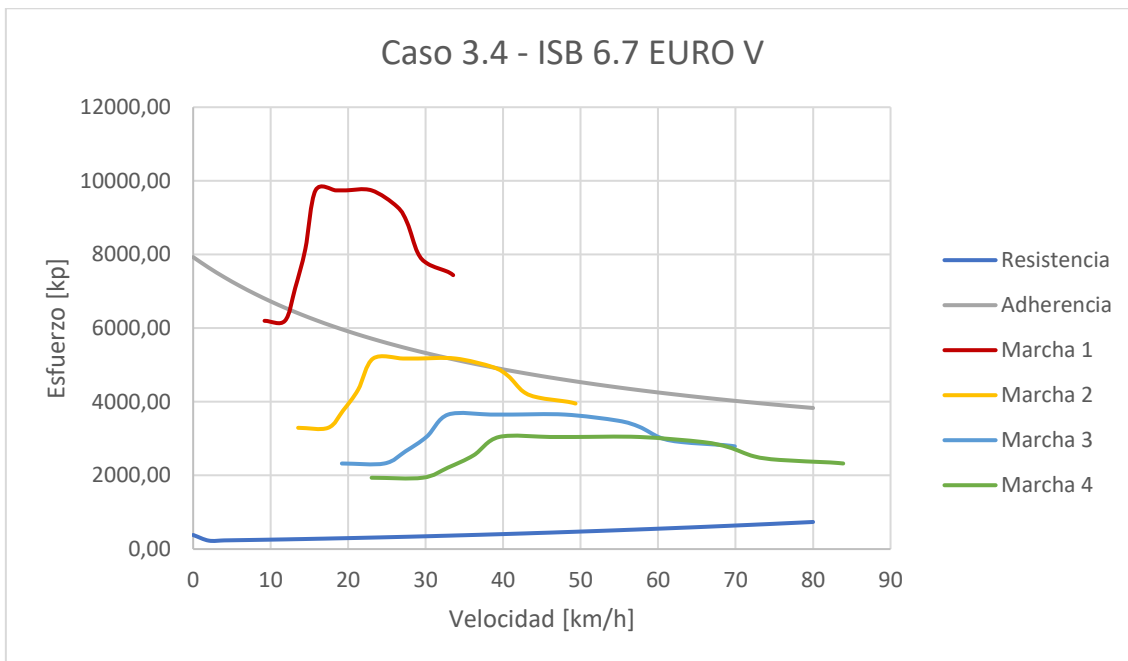
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	20
Marcha 3	16
Marcha 4	12
Marcha 5	10



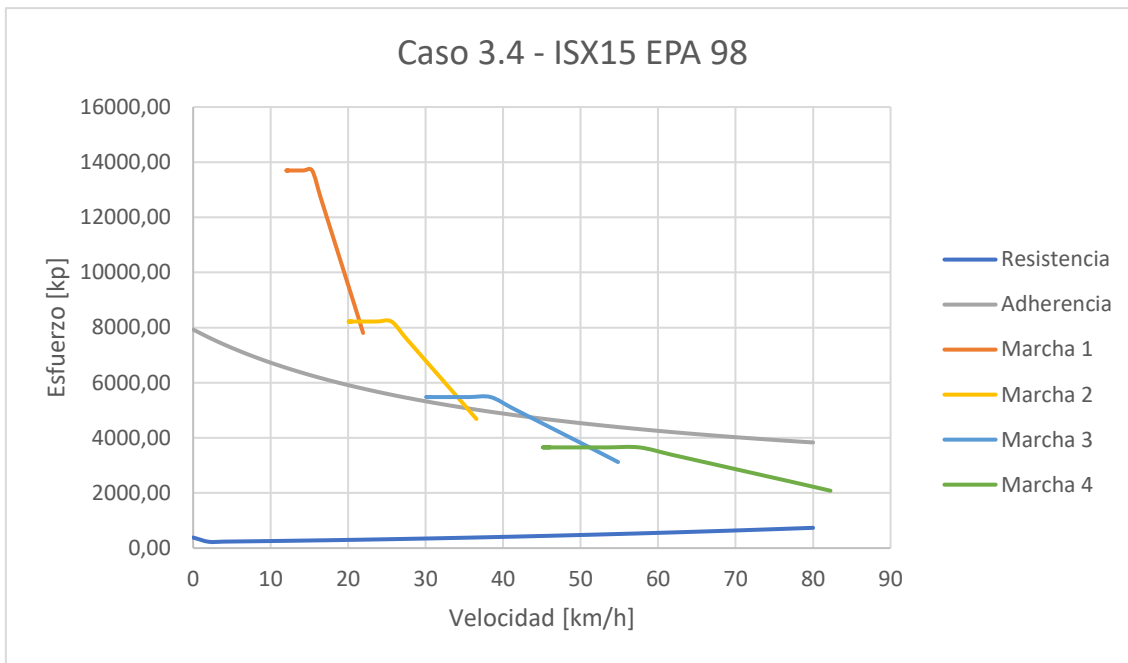
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	21
Marcha 3	15
Marcha 4	12
Marcha 5	9,7



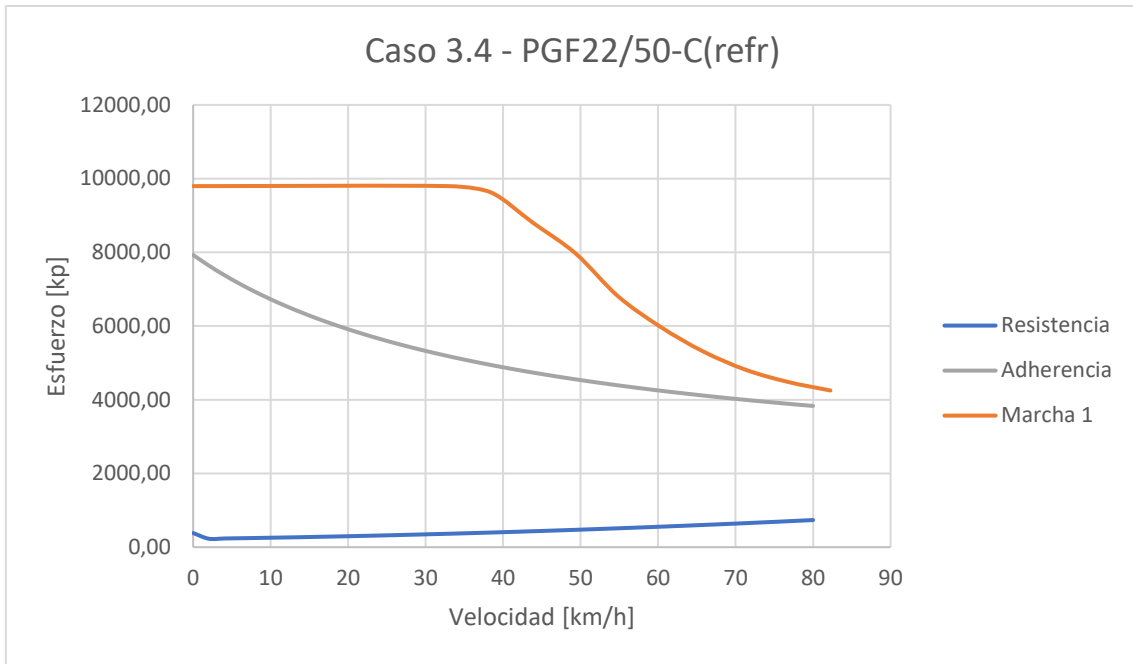
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	18
Marcha 3	13
Marcha 4	9,6



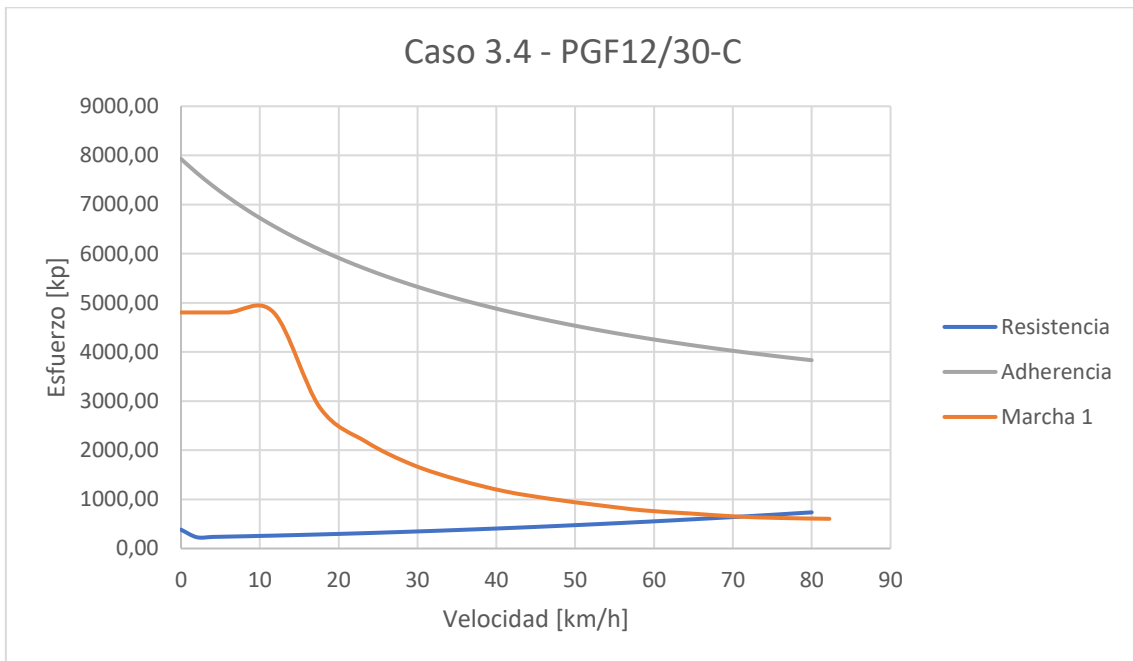
Marcha	i'
Marcha 1	25
Marcha 2	17
Marcha 3	12
Marcha 4	10



Marcha	i'
Marcha 1	30
Marcha 2	18
Marcha 3	12
Marcha 4	8

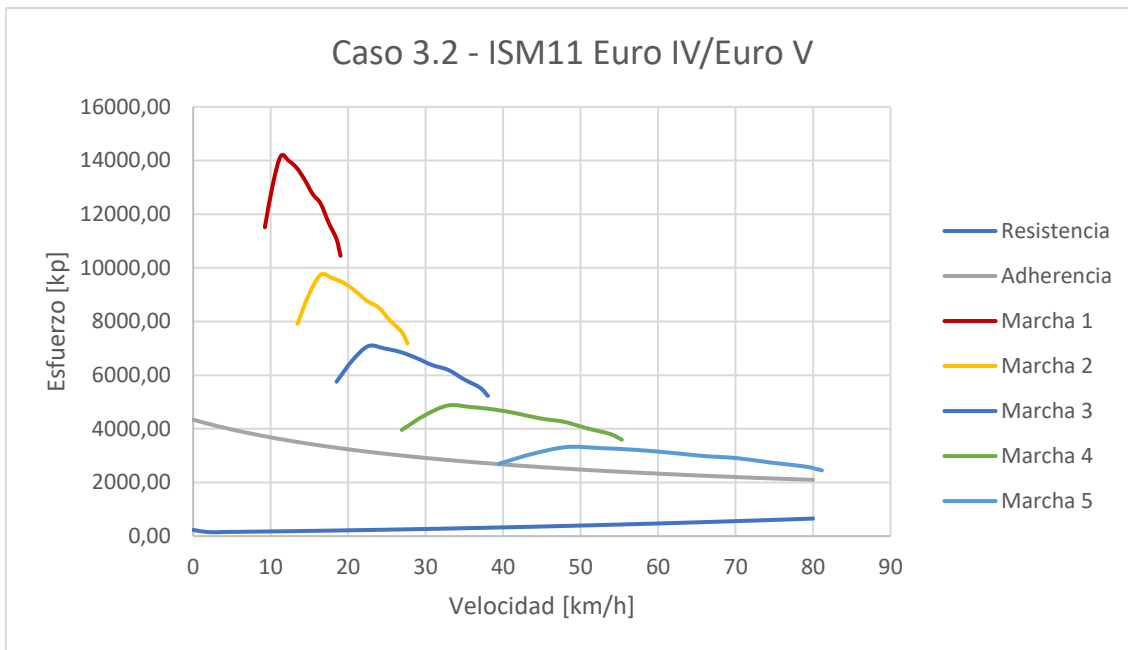


Marcha	i'
Marcha 1	12

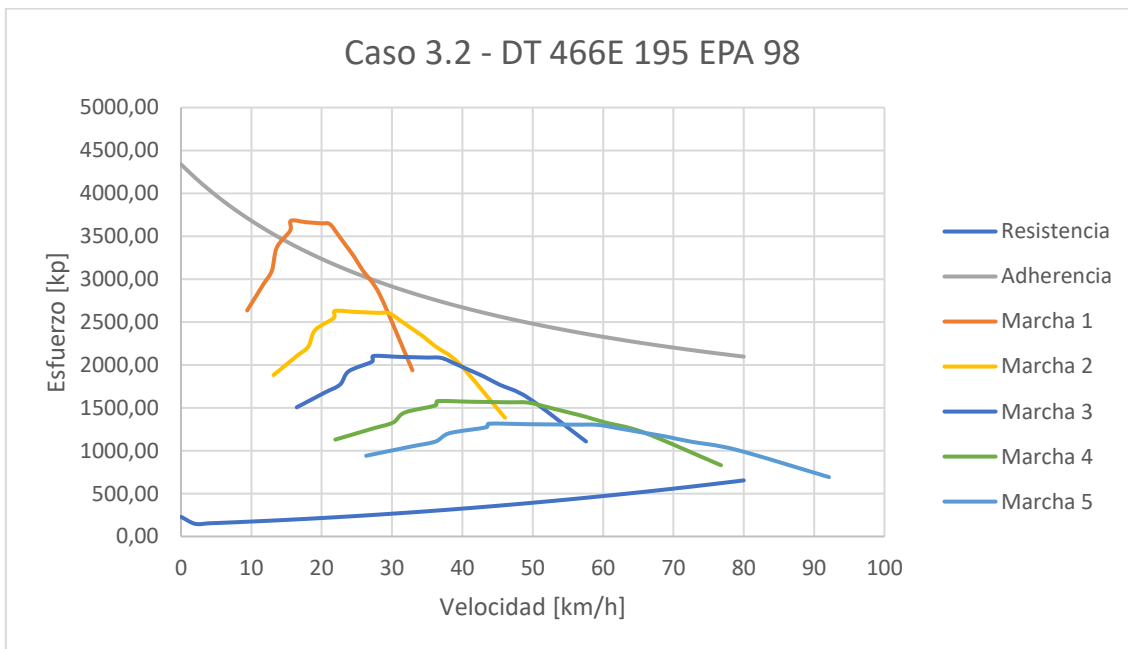


Marcha	i'
Marcha 1	56

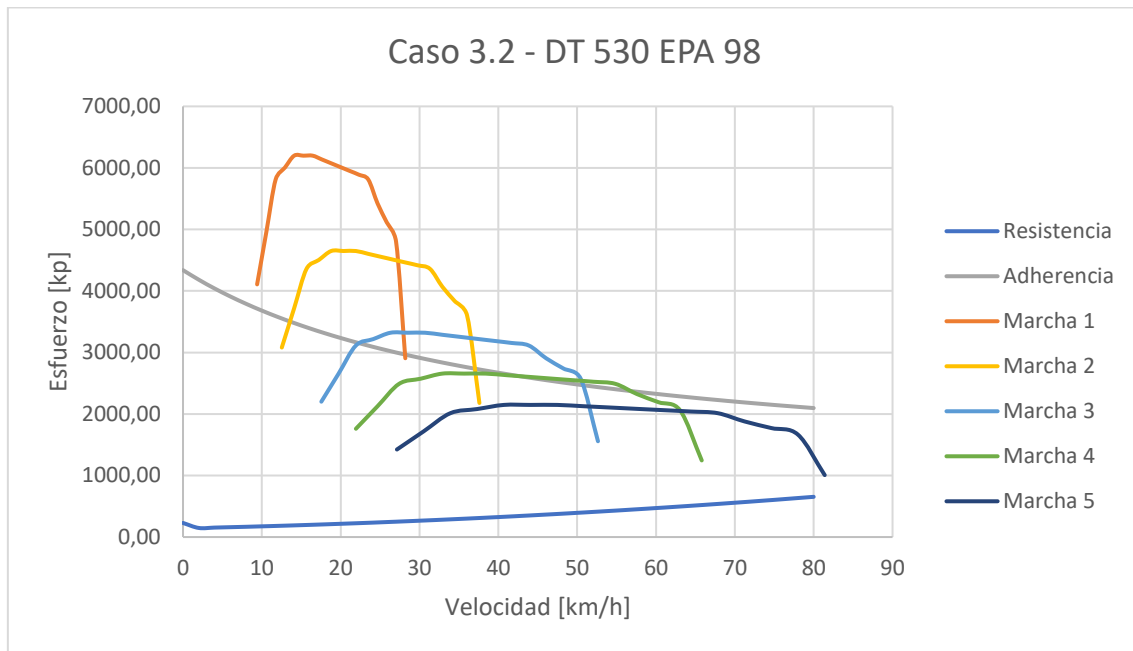
2 ejes



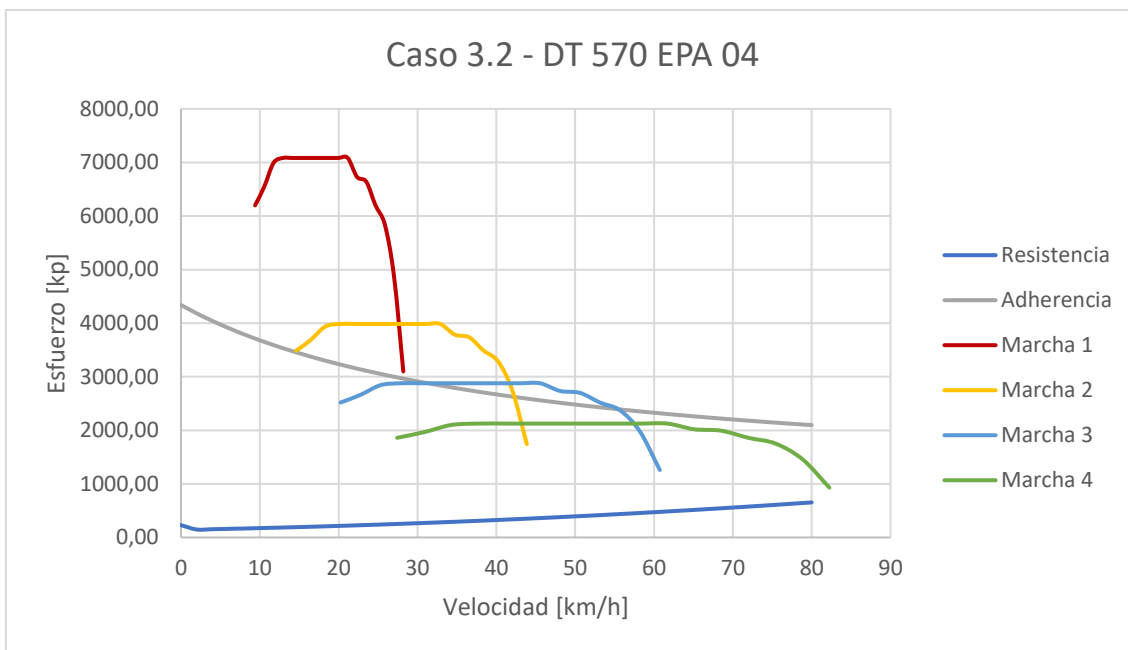
Marcha	i'
Marcha 1	32
Marcha 2	22
Marcha 3	16
Marcha 4	11
Marcha 5	7,5



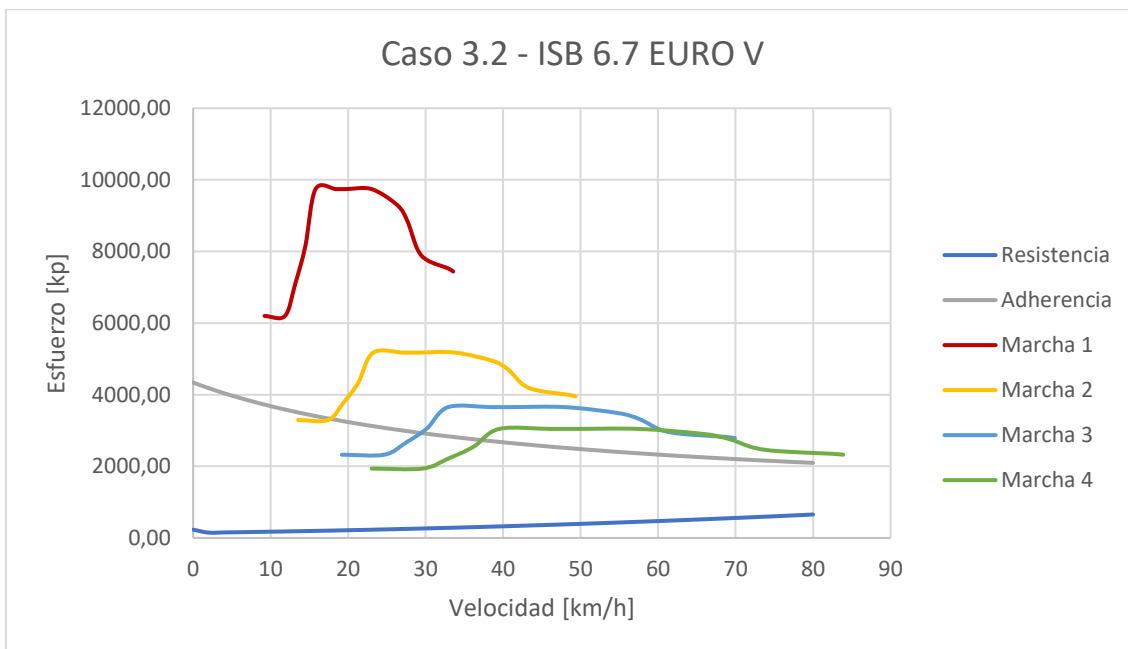
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	20
Marcha 3	16
Marcha 4	12
Marcha 5	10



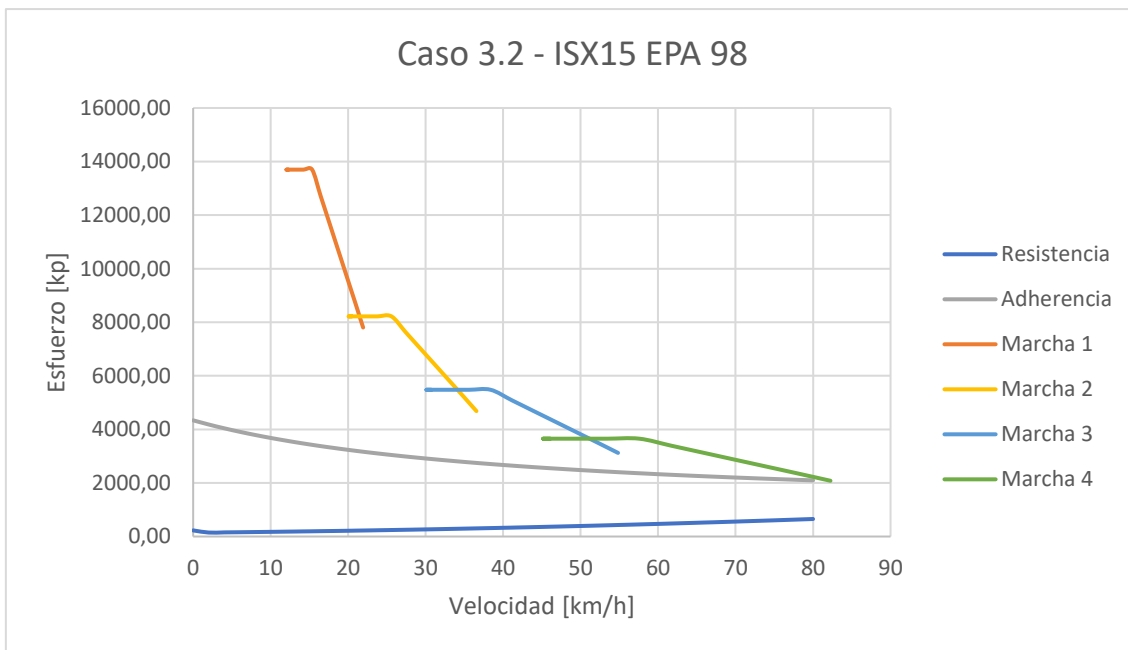
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	21
Marcha 3	15
Marcha 4	12
Marcha 5	9,7



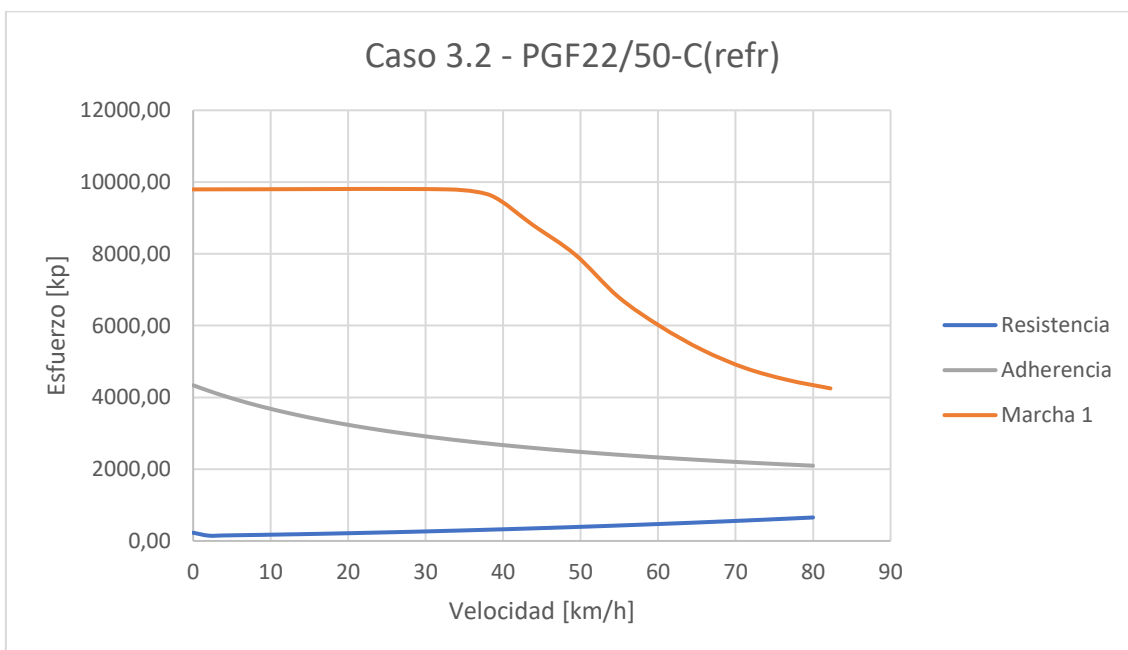
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	18
Marcha 3	13
Marcha 4	9,6



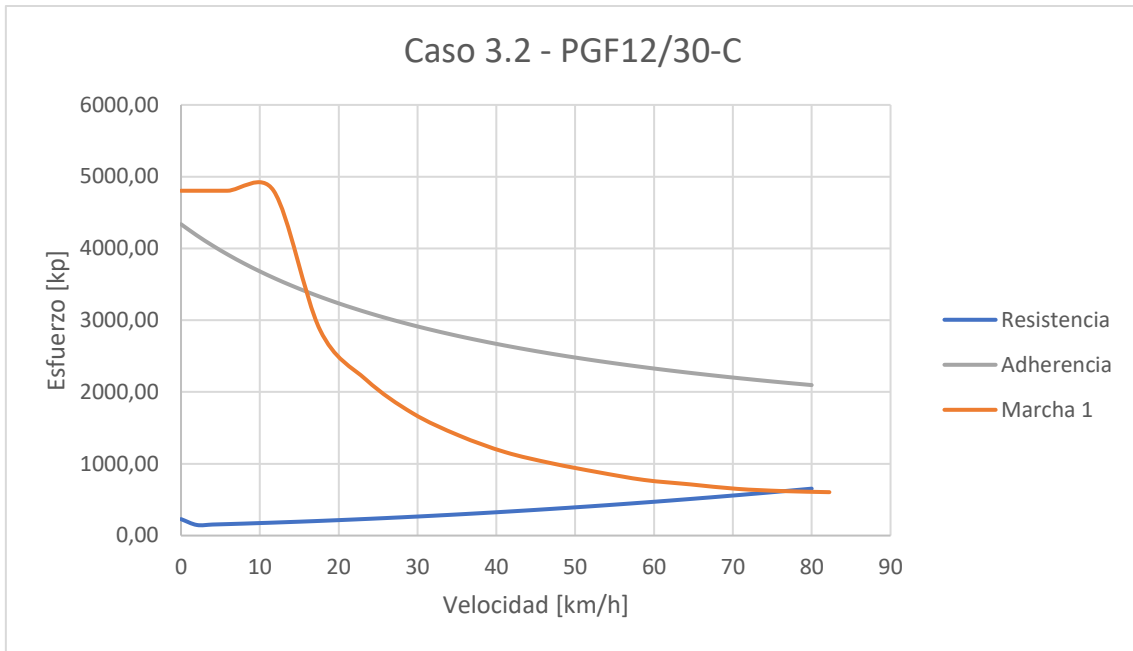
Marcha	i'
Marcha 1	25
Marcha 2	17
Marcha 3	12
Marcha 4	10



Marcha	i'
Marcha 1	30
Marcha 2	18
Marcha 3	12
Marcha 4	8



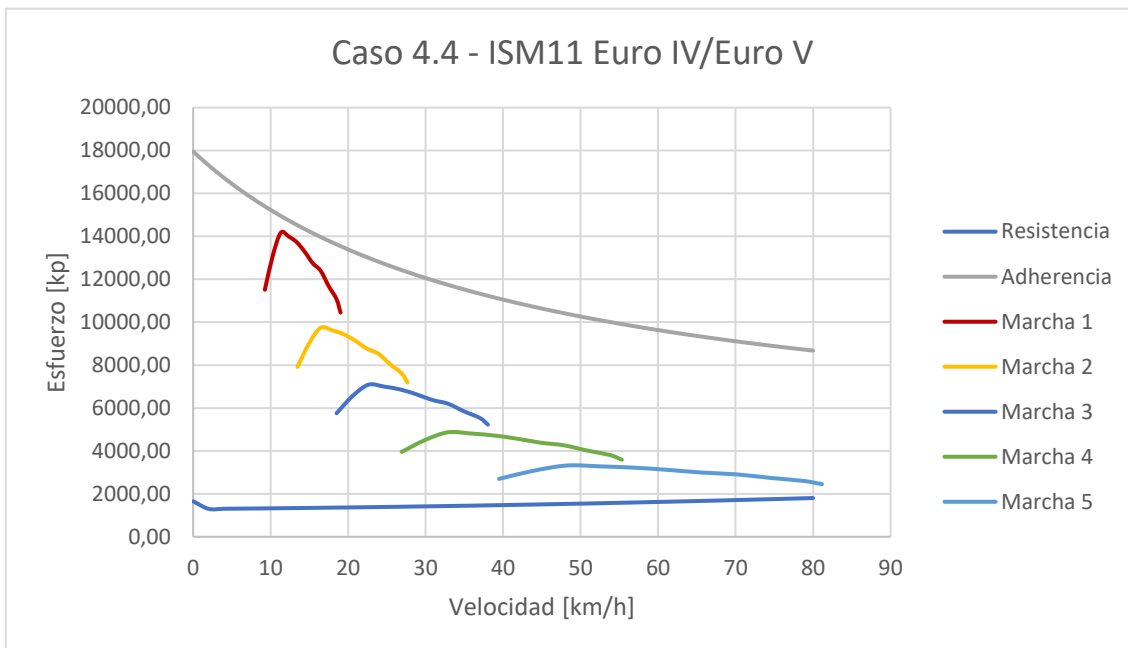
Marcha	i'
Marcha 1	12



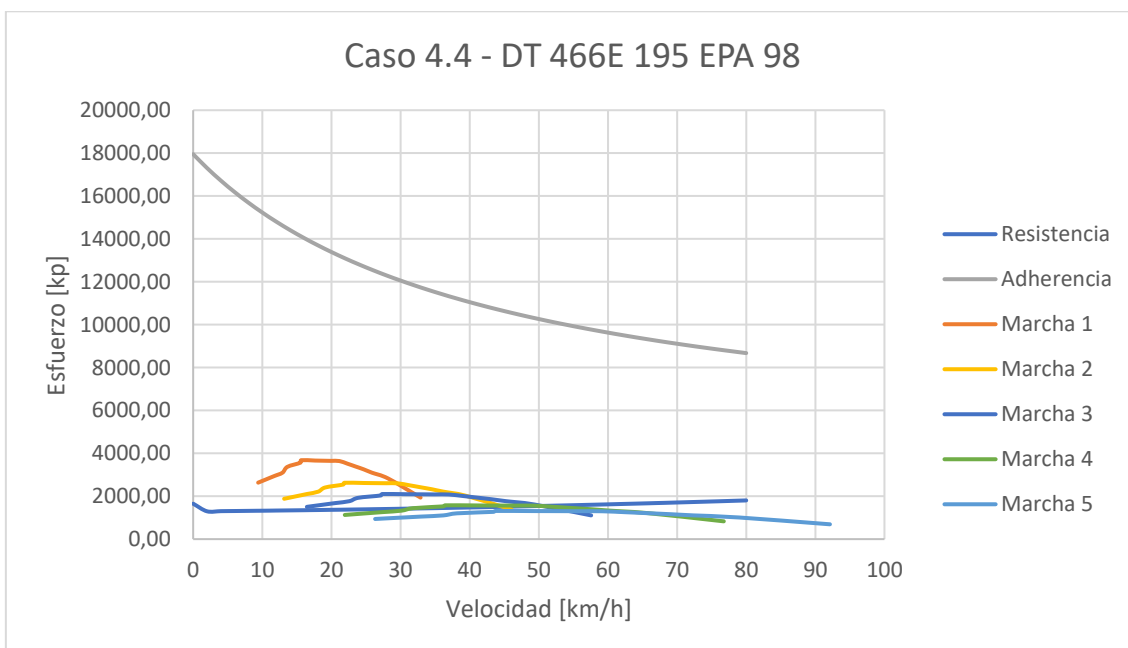
Marcha	i'
Marcha 1	56

Escenario 4

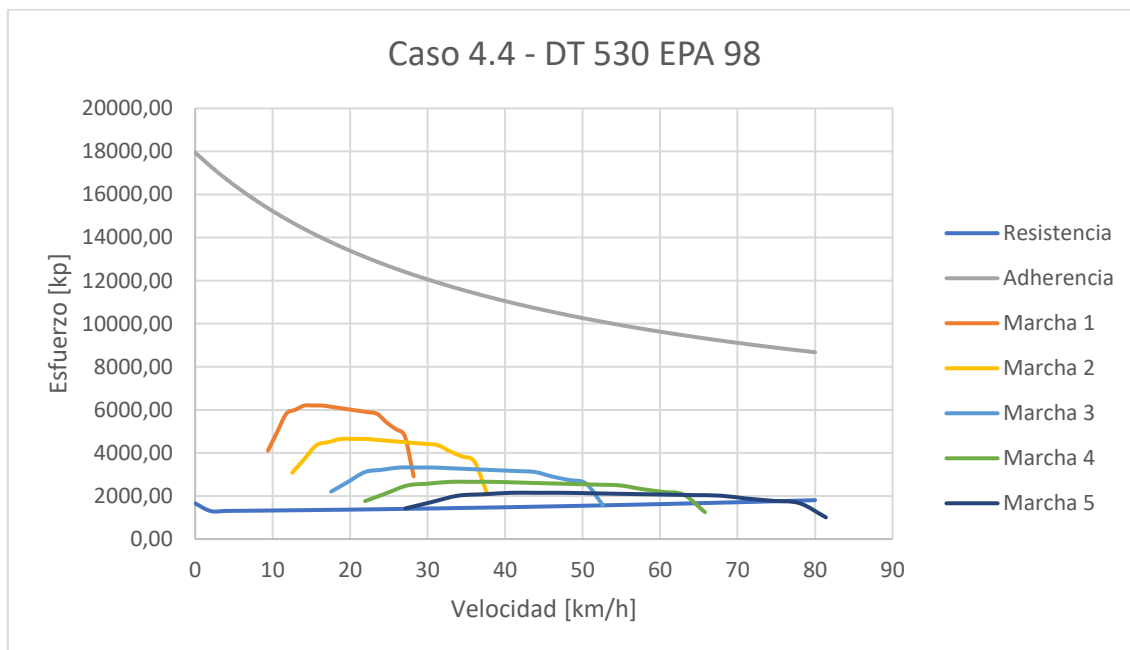
4 ejes



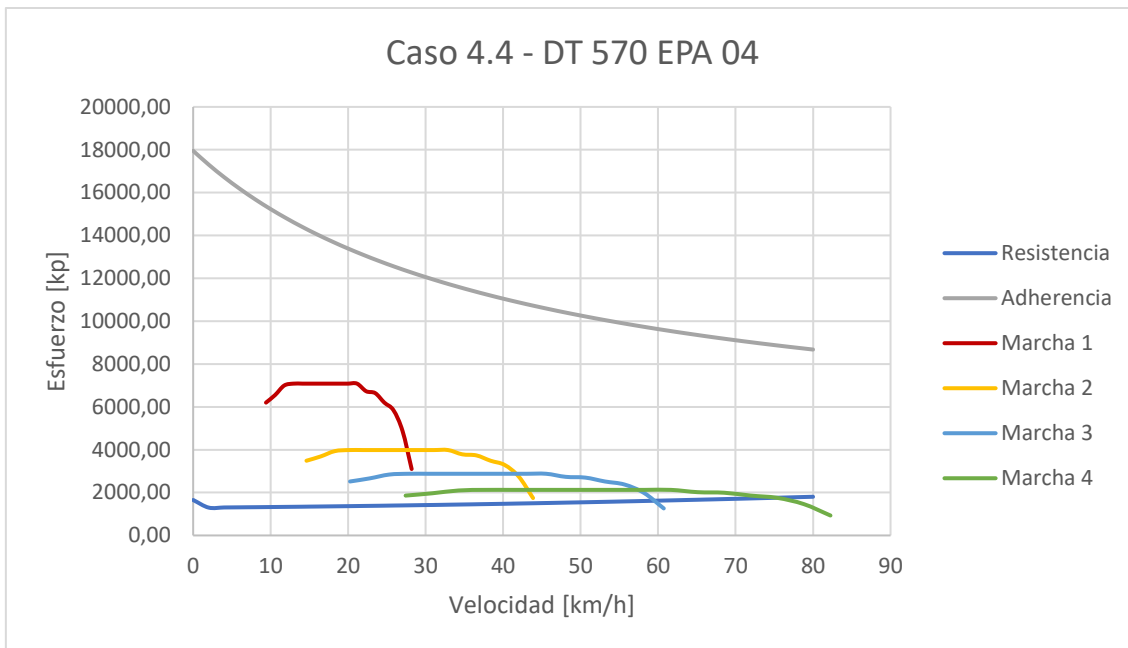
Marcha	i'
Marcha 1	32
Marcha 2	22
Marcha 3	16
Marcha 4	11
Marcha 5	7,5



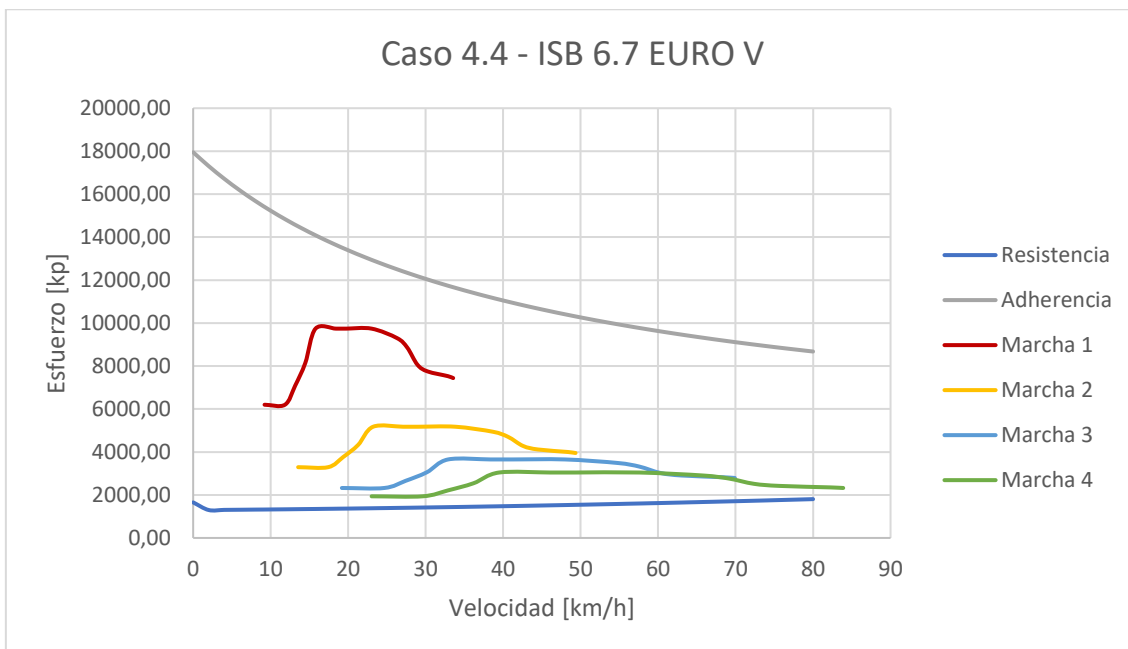
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	20
Marcha 3	16
Marcha 4	12
Marcha 5	10



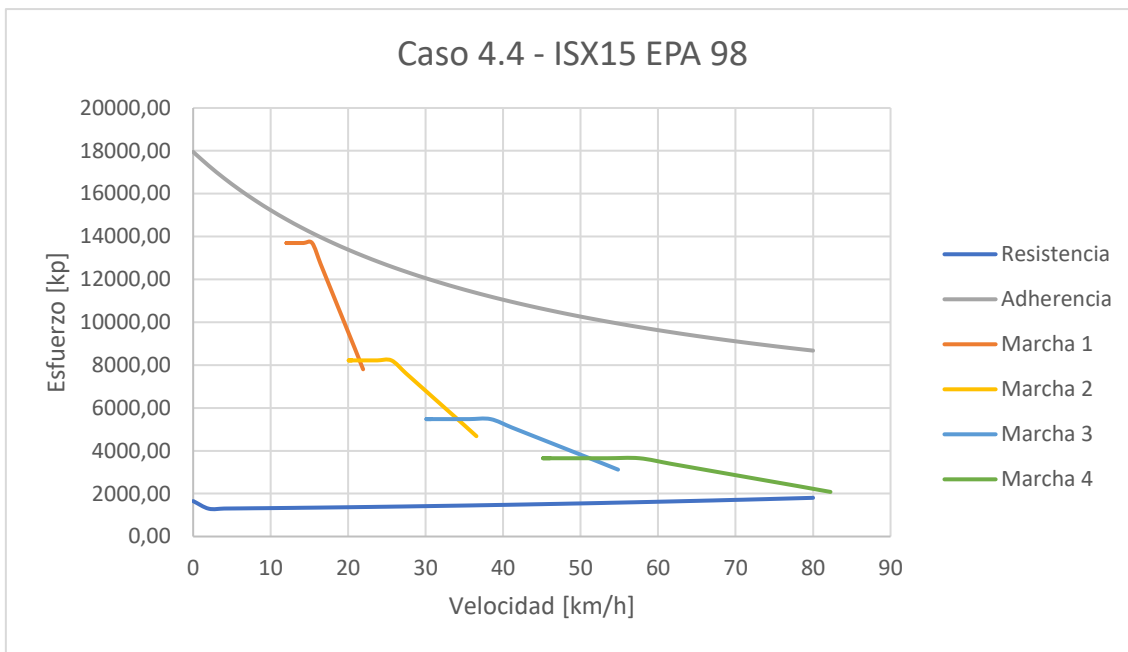
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	21
Marcha 3	15
Marcha 4	12
Marcha 5	9,7



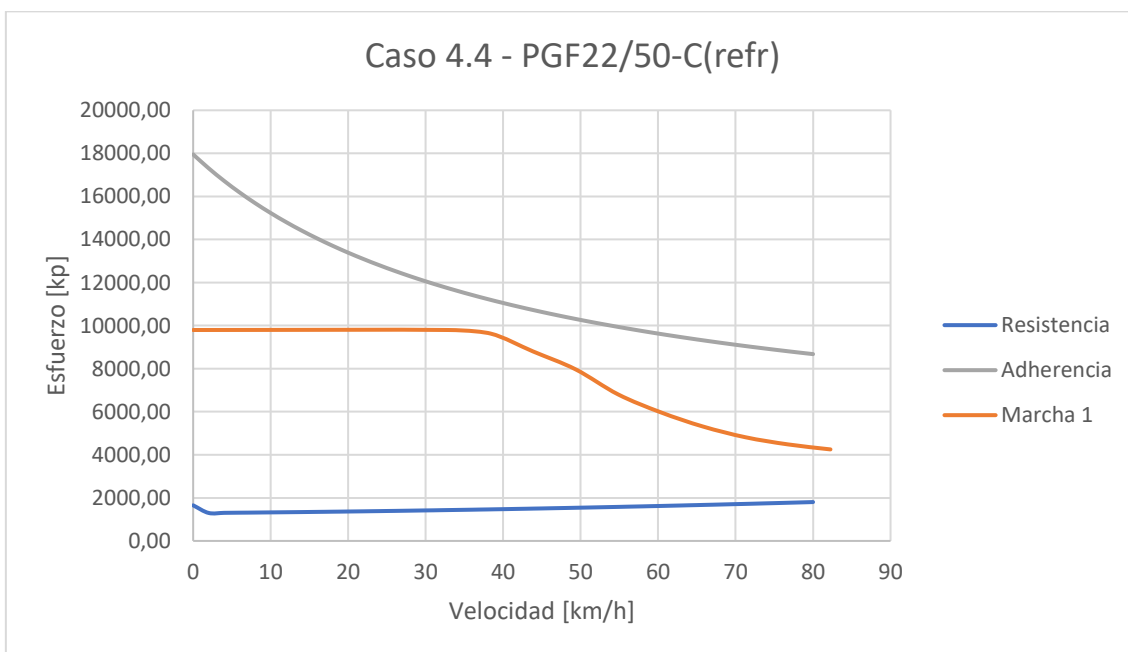
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	18
Marcha 3	13
Marcha 4	9,6



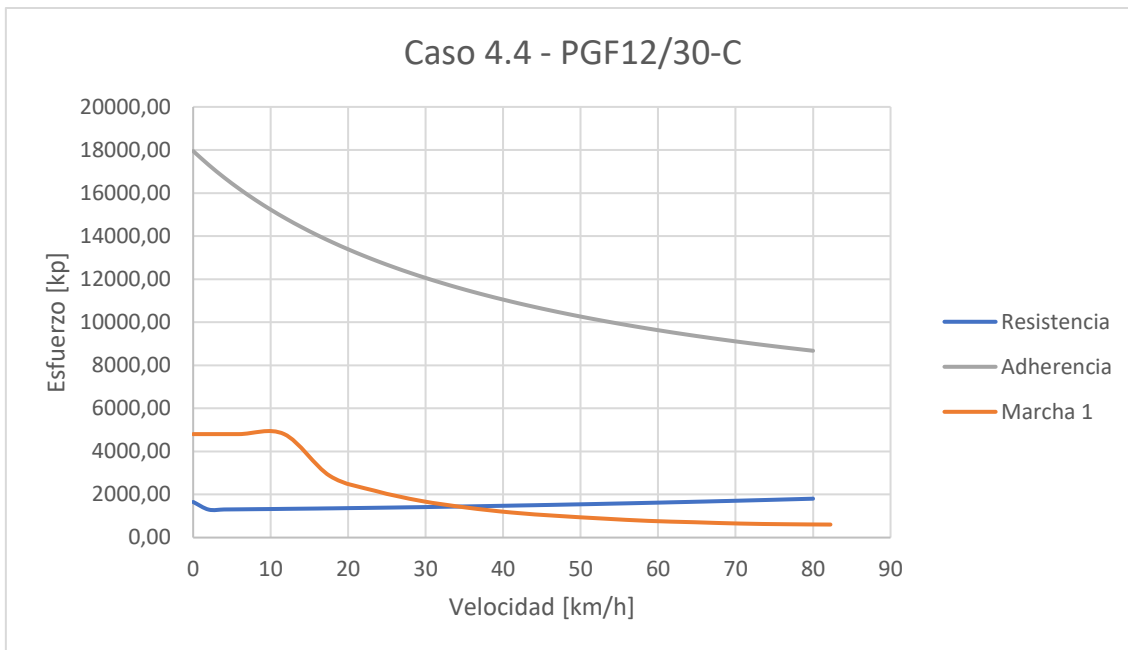
Marcha	i'
Marcha 1	25
Marcha 2	17
Marcha 3	12
Marcha 4	10



Marcha	i'
Marcha 1	30
Marcha 2	18
Marcha 3	12
Marcha 4	8

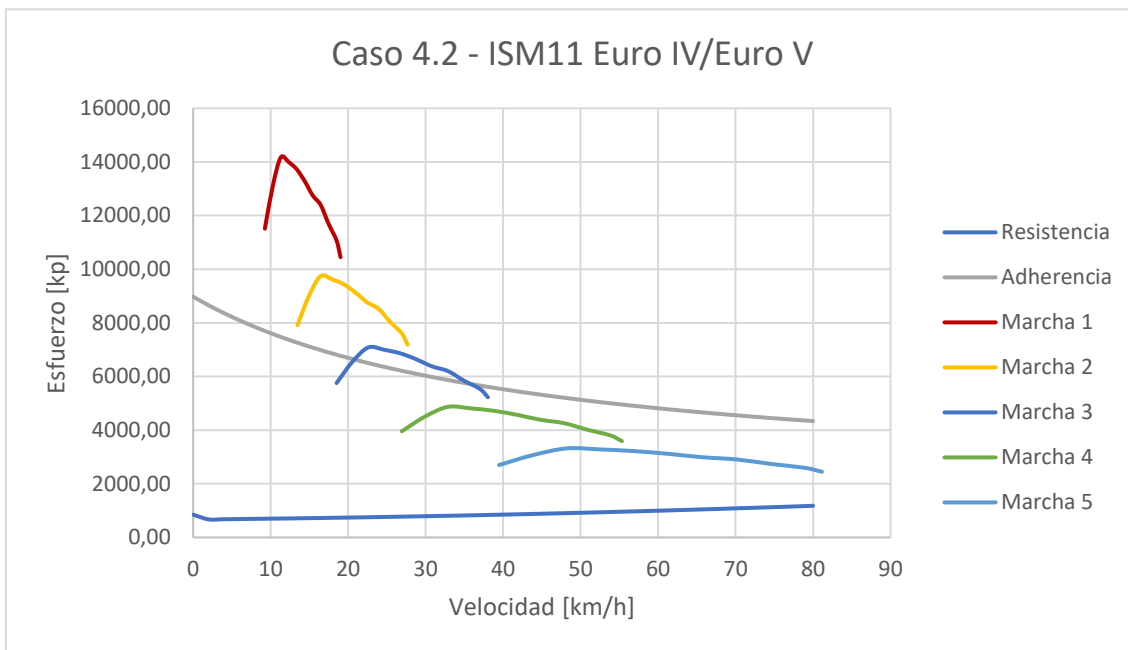


Marcha	i'
Marcha 1	12

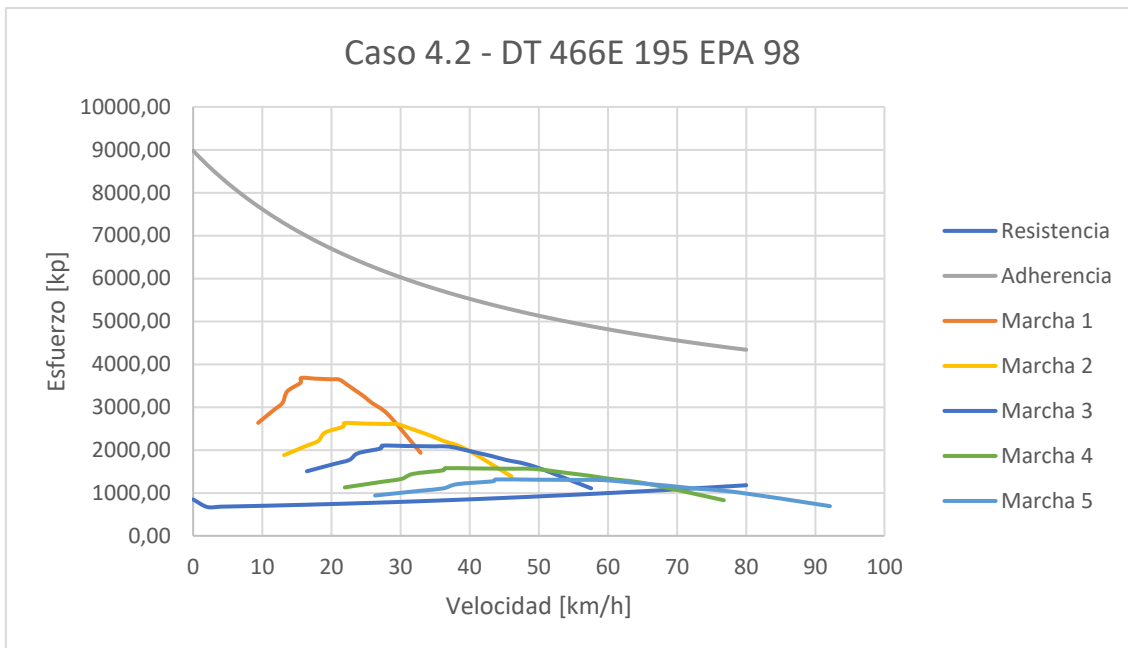


Marcha	i'
Marcha 1	56

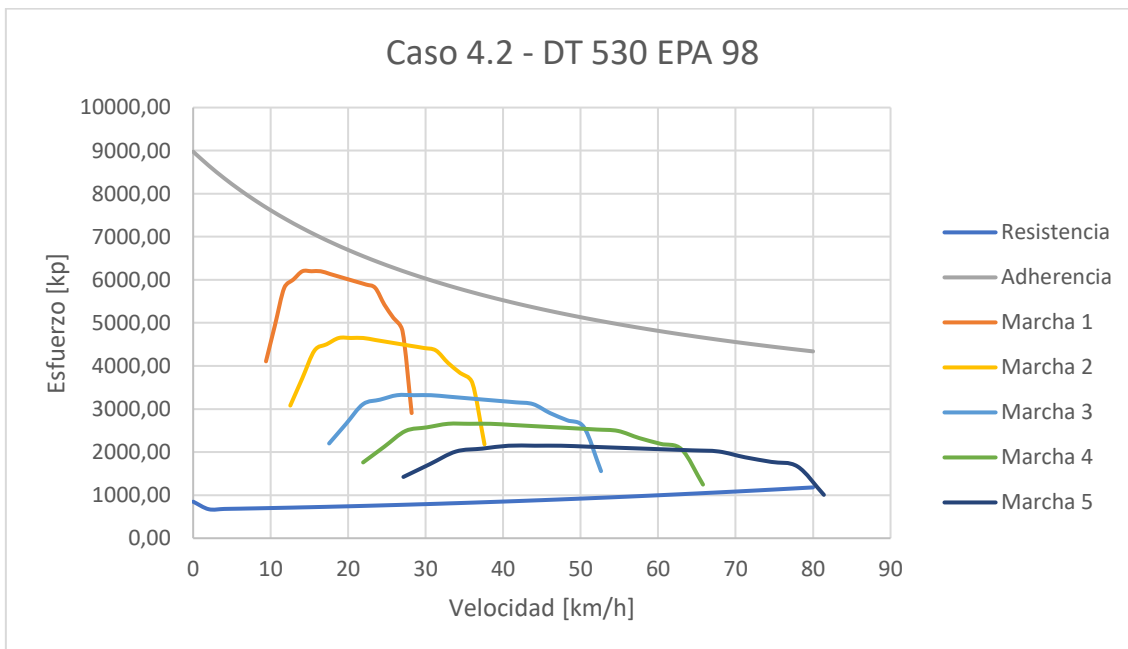
2 ejes



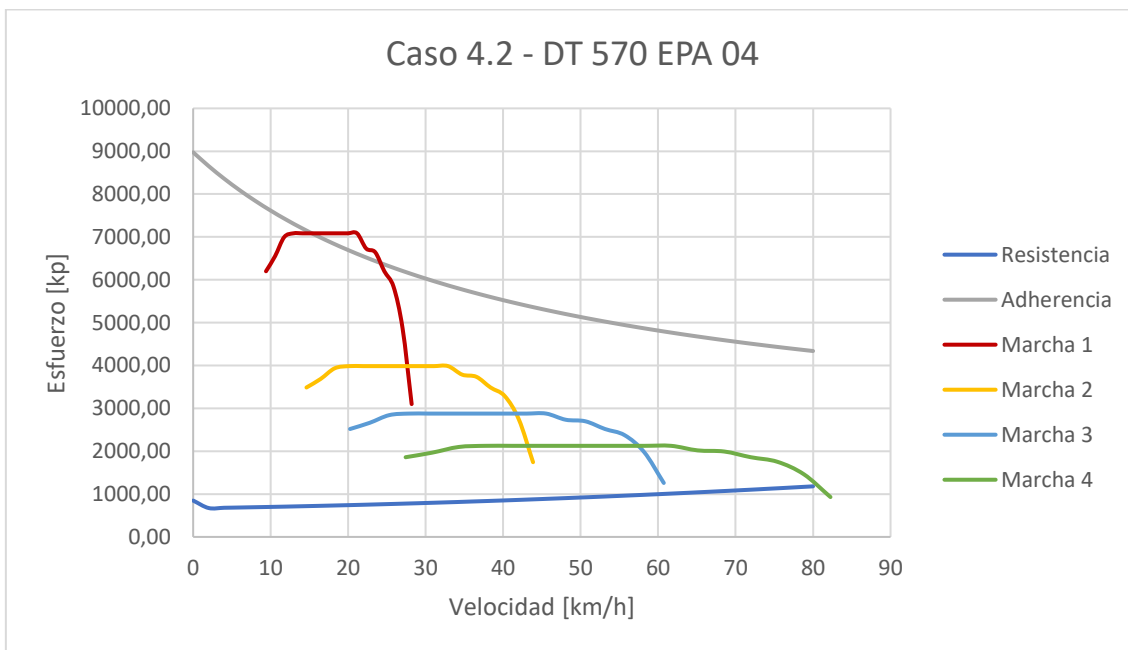
Marcha	i'
Marcha 1	32
Marcha 2	22
Marcha 3	16
Marcha 4	11
Marcha 5	7,5



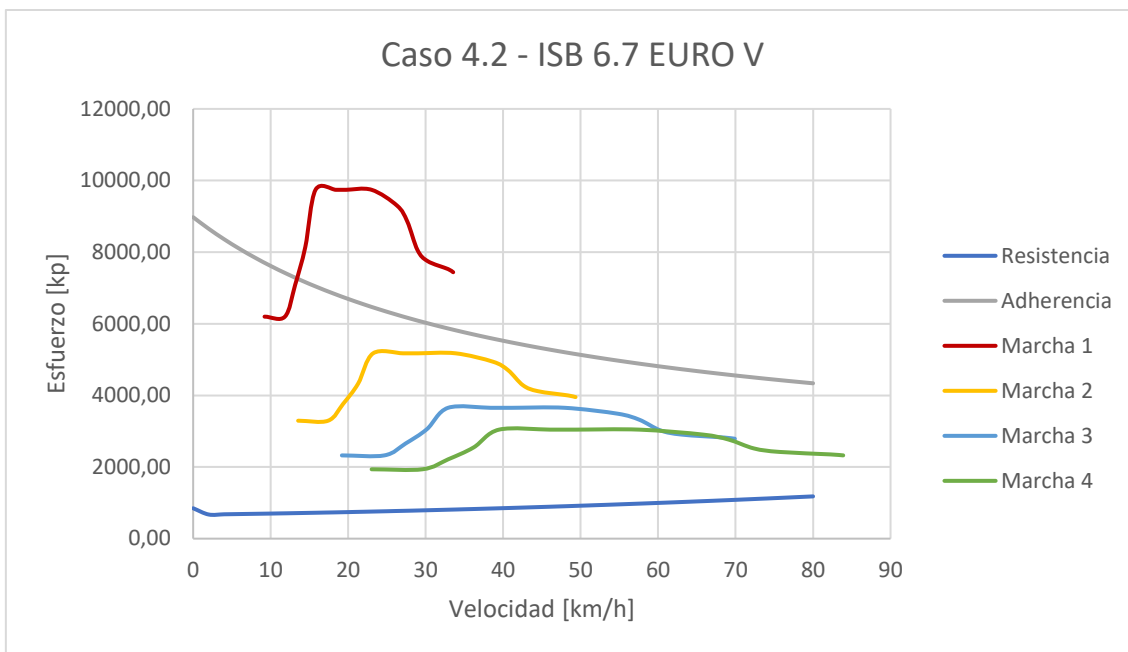
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	20
Marcha 3	16
Marcha 4	12
Marcha 5	10



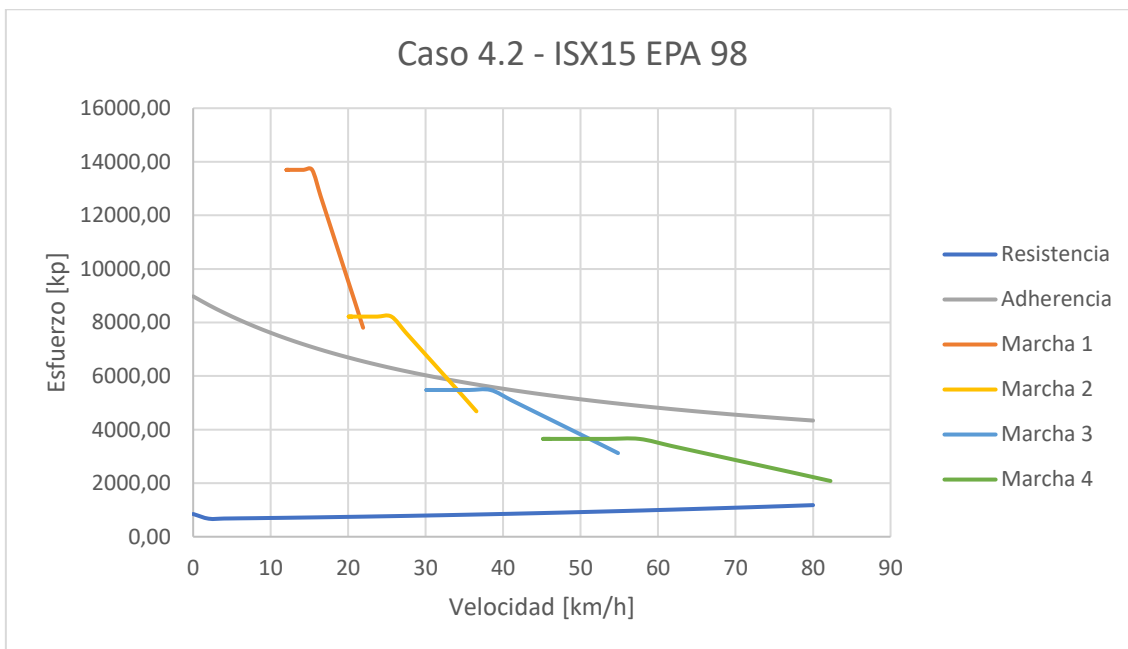
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	21
Marcha 3	15
Marcha 4	12
Marcha 5	9,7



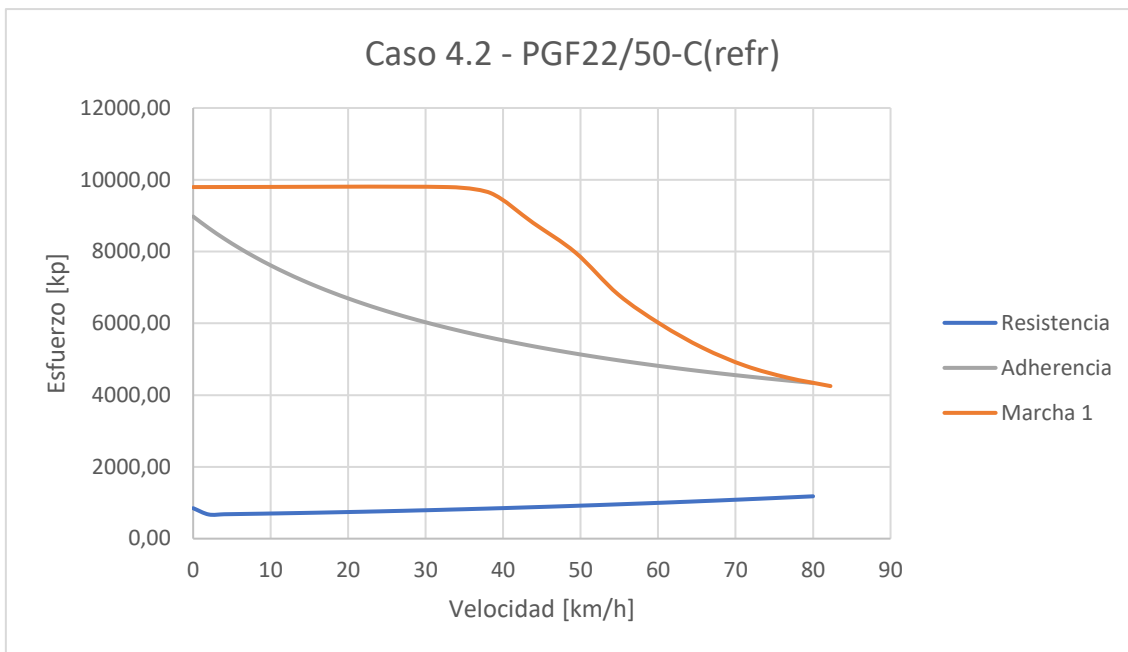
Marcha	i'
Marcha 1	28
Marcha 2	18
Marcha 3	13
Marcha 4	9,6



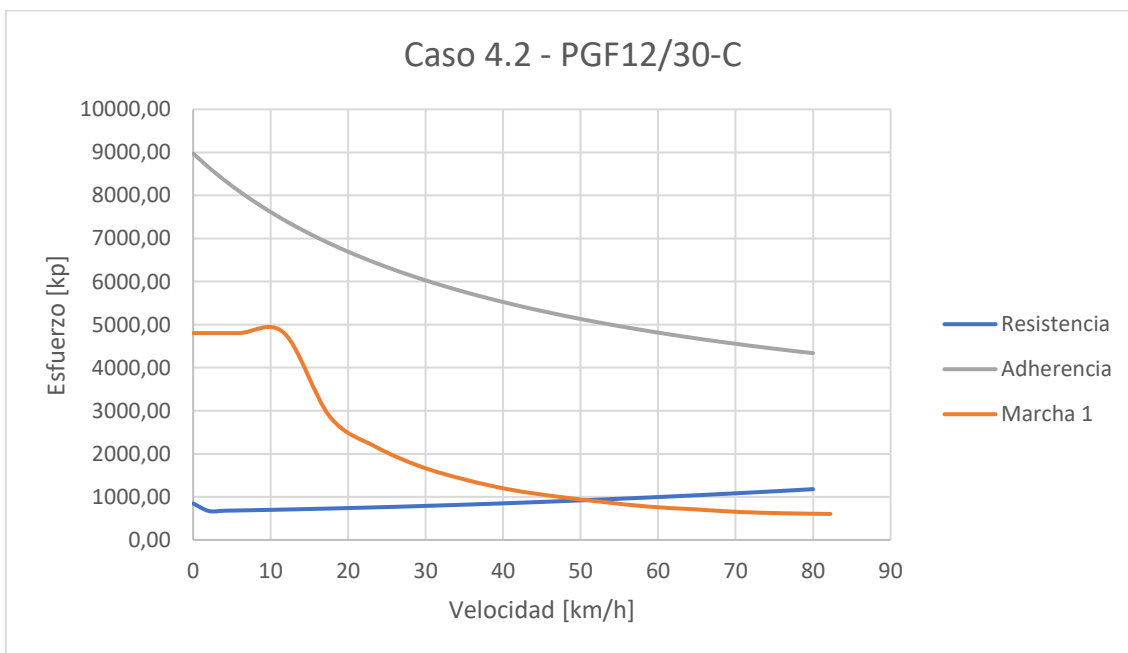
Marcha	i'
Marcha 1	25
Marcha 2	17
Marcha 3	12
Marcha 4	10



Marcha	i'
Marcha 1	30
Marcha 2	18
Marcha 3	12
Marcha 4	8



Marcha	i'
Marcha 1	12



Marcha	i'
Marcha 1	56