



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Cálculo y modelización del comportamiento en
régimen de marcha de las prestaciones de
automóvil eléctrico

Autor

Pablo Calderón Gil

Directores

Emilio Larrodé Pellicer
Juan Bautista Arroyo García

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)
Septiembre del 2015



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. PABLO CALDERÓN GIL,

con nº de DNI 73020606E en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado _____, (Título del Trabajo)

Cálculo y modelización del comportamiento en régimen de marcha de las
prestaciones de automóvil eléctrico

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, a 23 de Septiembre de 2015

Fdo: PABLO CALDERÓN GIL

CÁLCULO Y MODELIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN RÉGIMEN DE MARCHA DE LAS PRESTACIONES DE AUTOMÓVIL ELÉCTRICO

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo dentro del Grupo de Investigación en Transporte y Logística (GITEL) de la Universidad de Zaragoza, como consecuencia de una colaboración de dicho grupo con la empresa aragonesa Zytel Automoción S.L.

El objetivo principal de este trabajo es la caracterización del comportamiento de un vehículo eléctrico de la empresa Zytel mediante un software de simulación propiedad del grupo GITEL. El desarrollo del trabajo se dividió en una serie de tareas más sencillas, marcando unos sub-objetivos que se fueron cumpliendo uno a uno hasta cumplir finalmente con el objetivo principal.

En primer lugar se llevó a cabo una fase de documentación sobre vehículos eléctricos para poder identificar los componentes que lo forman y conocer su comportamiento. Tras esto, se estudió el estado inicial del modelo del vehículo, analizando cada uno de los sistemas que lo forman y comprobando sus propiedades. También se realizó una etapa de aprendizaje del manejo de la herramienta de simulación utilizada, el software ADAMS/Car.

La siguiente tarea fue la realización de una serie de ensayos para analizar las prestaciones del vehículo. Se llevaron a cabo simulaciones en dos situaciones distintas de adherencia del pavimento, en buenas condiciones y en condiciones desfavorables, comprobando la aceleración máxima y la estabilidad en el paso por curva del vehículo para ambas situaciones. Además, estos ensayos se realizaron también sobre una variante más pesada del modelo, con el fin de analizar la influencia que tiene la masa sobre el comportamiento del vehículo.

Posteriormente, se llevó a cabo la construcción en ADAMS/Car de un circuito que representara un recorrido real. Se trataba de un trayecto urbano que pudiera realizarse con el vehículo real, por lo que se diseñó un recorrido que circulara por calles cercanas a la Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Para el diseño y la obtención de las coordenadas de cada tramo del circuito se utilizó la aplicación Google Earth.

Finalmente, se realizaron las simulaciones sobre el circuito creado, tanto para el modelo inicial del vehículo como para la variante de mayor peso utilizada en los ensayos previos. Se analizaron los resultados obtenidos comparando el comportamiento de ambos modelos, así como la energía que necesitaba cada uno de ellos para dar una vuelta completa al circuito.

ÍNDICES

Índice de Contenidos

1	Introducción	2
1.1	Objetivo y Alcance del Trabajo.....	2
1.2	Contexto del Proyecto.....	3
1.3	El Vehículo	3
1.4	Trabajo previo	4
1.5	Descripción del Problema	4
1.5.1	Condiciones iniciales	4
1.5.2	ADAMS/Car	5
1.5.3	Metodología	6
1.6	Estructura de la Memoria.....	6
2	Ensayos previos	8
2.1	Situación inicial.....	8
2.2	Creación de carreteras	9
2.2.1	Tramo recto.....	10
2.2.2	Tramo curvo	10
2.2.3	Circuito cerrado.....	11
2.3	Análisis y Resultados	11
2.3.1	Tipo de análisis realizado	12
2.3.2	Análisis en tramo recto	13
2.3.3	Análisis en tramo curvo.....	18
2.3.4	Análisis en circuito cerrado	25
2.3.5	Validación de resultados	29
3	Simulación en recorrido real	31
3.1	Elección del recorrido.....	31
3.2	Toma de datos.....	33
3.3	Creación del circuito 3D en ADAMS/Car	34
4	Análisis y Resultados	36
4.1	Análisis del consumo de energía.....	39
5	Conclusiones.....	42
5.1	Resumen y cumplimiento de objetivos.....	42
5.2	Posibilidades de continuación.....	43
5.3	Incidencias.....	43
6	Fuentes de información	44

Anexo I: Road Builder	46
Anexo II: Archivos DCD.....	51
II.1 Archivos DCD utilizados.....	53
Anexo III: Propiedades del vehículo	60
III.1 Subsistema de las ruedas	60
III.2 Subsistema de tracción	61
III.3 Subsistema de los frenos.....	64
III.4 Subsistema de la dirección.....	64
III.5 Subsistema de la suspensión.....	65
III.6 Subsistema del chasis.....	66

Índice de Figuras

Figura 1. Modelo virtual en ADAMS/Car.....	9
Figura 2. Tramo recto.....	10
Figura 3. Tramo curvo.....	10
Figura 4. Circuito cerrado.....	11
Figura 5. Ventanas del análisis 3D Road.....	13
Figura 6. Comparación velocidades en buenas condiciones.....	14
Figura 7. Aceleración del vehículo ligero en buenas condiciones.....	14
Figura 8. Aceleración del vehículo de mayor masa en buenas condiciones.....	15
Figura 9. Aceleración frente a rpm de los dos modelos.....	15
Figura 10. Detalle de aceleración máxima del los dos modelos.....	16
Figura 11. Comparación velocidades en condiciones desfavorables.....	16
Figura 12. Aceleración del vehículo de menor masa en condiciones desfavorables.....	17
Figura 13. Aceleración del vehículo con mayor masa en condiciones desfavorables.....	17
Figura 14. Situación final de simulación con error.....	18
Figura 15. Velocidad en simulación con error.....	19
Figura 16. Aceleración longitudinal en simulación con error.....	19
Figura 17. Aceleración lateral en simulación con error.....	20
Figura 18. Comparación velocidades en curva en buenas condiciones.....	20
Figura 19. Aceleración longitudinal en curva del modelo con menor masa en buenas condiciones.....	21
Figura 20. Aceleración longitudinal en curva del modelo con mayor masa en buenas condiciones.....	21
Figura 21. Comparación aceleración lateral en curva en buenas condiciones.....	22
Figura 22. Comparación velocidades en curva en condiciones desfavorables.....	23
Figura 23. Comparación aceleración longitudinal en curva en condiciones desfavorables.....	24
Figura 24. Comparación aceleración lateral en curva en condiciones desfavorables.....	24
Figura 25. Comparación velocidades circuito cerrado en buenas condiciones.....	25
Figura 26. Comparación aceleración longitudinal circuito cerrado en buenas condiciones.....	26
Figura 27. Detalle aceleración longitudinal circuito cerrado en buenas condiciones.....	26
Figura 28. Comparación aceleración lateral circuito cerrado en buenas condiciones.....	27
Figura 29. Comparación velocidades circuito cerrado en condiciones desfavorables.....	27
Figura 30. Comparación aceleración longitudinal circuito cerrado en condiciones desfavorables.....	28
Figura 31. Comparación aceleración lateral circuito cerrado en condiciones desfavorables.....	28

Figura 32. Diseño de recorrido real en Google Earth.....	32
Figura 33. Detalle de tramo en Google Earth.....	33
Figura 34. Detalle de perfil de elevación en Google Earth.....	34
Figura 35. Circuito real creado en ADAMS/Car.....	35
Figura 36. Detalle del desnivel en ADAMS/Car.....	35
Figura 37. Altura del vehículo a lo largo del circuito.....	36
Figura 38. Comparación velocidades circuito.....	37
Figura 39. Comparación aceleración longitudinal en circuito.....	38
Figura 40. Comparación aceleración lateral en circuito.....	38
Figura 41. Fuerza vehículo con mayor masa.....	39
Figura 42. Fuerza vehículo con menor masa.....	39
Figura 43. Energía vehículo con mayor masa.....	40
Figura 44. Energía vehículo con menor masa.....	40
Figura 45. Pestaña Header de Road Builder.....	46
Figura 46. Pestaña Global de Road Builder.....	47
Figura 47. Pestaña Road Points de Road Builder.....	48
Figura 48. Pestaña Obstacle de Road Builder.....	49
Figura 49. Pestaña Road Generator de Road Builder.....	50
Figura 50. Características archivo DCD.....	51
Figura 51. Unidades archivo DCD.....	51
Figura 52. Datos archivo DCD sin control de velocidad.....	52
Figura 53. Datos archivo DCD con control de velocidad.....	53
Figura 54. Archivo recta_acc.dcd.....	54
Figura 55. Archivo curva_rapida.dcd.....	55
Figura 56. Archivo curva_desfavorable.dcd.....	56
Figura 57. Archivo circuito_cerrado.dcd.....	57
Figura 58. Archivo circuito_cerrado_desfavorable.dcd.....	58
Figura 59. Archivo circuito.dcd.....	59
Figura 60. Curva del mapa motor.....	62

Índice de tablas

Tabla 1. Autonomía estimada de cada variante.....	41
Tabla 2. Tipos de control de velocidad y dirección	52
Tabla 3. Propiedades del subsistema de las ruedas.....	60
Tabla 4. Propiedades del subsistema de tracción	61
Tabla 5. Mapa motor.....	63
Tabla 6. Propiedades del subsistema de los frenos	64
Tabla 7. Propiedades del subsistema de dirección	64
Tabla 8. Propiedades suspensión delantera	65
Tabla 9. Propiedades suspensión trasera.....	65
Tabla 10. Propiedades del subsistema del chasis	66
Tabla 11. Reparto de masas del modelo	66

MEMORIA

1 Introducción

1.1 Objetivo y Alcance del Trabajo

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es la caracterización del comportamiento en orden de marcha de un vehículo eléctrico de altas prestaciones. Para ello se parte de un modelo virtual del vehículo en el programa ADAMS/Car. Sobre este modelo se realizarán las simulaciones necesarias para comprobar si dicho modelo representa fielmente al vehículo o, por el contrario, se necesita modificarlo para acercarlo más al prototipo real.

Tener un modelo virtual fiable del vehículo resulta de gran utilidad, ya que con él se podrían realizar numerosas simulaciones, analizando diversas situaciones de conducción sin necesidad de realizar ensayos reales, que requieren una mayor inversión económica. Además se podrían realizar ensayos con variaciones del vehículo modificando cualquiera de sus componentes de forma mucho más rápida, ya que solo sería necesario modificar el modelo virtual y no el prototipo real. De esta forma se podrían llevar a cabo análisis sobre situaciones de conducción o variantes del modelo cuya realización con el vehículo real provocaría unos costes excesivos de tiempo y dinero.

Para asegurar el cumplimiento del objetivo principal descrito anteriormente, se definieron los siguientes sub-objetivos:

- Conocer el estado inicial del modelo virtual del vehículo, identificando los sistemas que lo forman. Será necesario conocer las propiedades que definen cada sistema del vehículo.
- Adquirir los conocimientos necesarios para manejar el software ADAMS/Car, tanto para llevar a cabo simulaciones y análisis como para realizar posibles modificaciones sobre el modelo.
- Realizar ensayos sobre el modelo para comprobar si su comportamiento se corresponde con el que tendría el vehículo real. También se ensayará con una variante de mayor peso del modelo para analizar la influencia de la masa en el comportamiento del vehículo.
- Construir un modelo de un recorrido urbano real sobre el que realizar la simulación y que pueda recorrer también el vehículo real.
- Representar y analizar los resultados obtenidos acerca del comportamiento del vehículo al recorrer el circuito urbano creado.

1.2 Contexto del Proyecto

El presente Trabajo de Fin de Grado se ha realizado en el Grupo de Investigación en Transporte y Logística (GITEL) de la Universidad de Zaragoza, situado en el edificio Agustín de Betancourt de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura.

El grupo GITEL realiza investigaciones en áreas relacionadas con el transporte, ya sea en ingeniería de vehículos o en gestión del transporte y logística, y ofrece apoyo técnico a empresas en dichos campos.

Este Trabajo de Fin de Grado surge en una colaboración entre el grupo GITEL y la empresa aragonesa Zytel Automoción S.L., que se dedica a la electrificación de vehículos y la creación de vehículos eléctricos.

Esta colaboración nace de la necesidad de la puesta a punto de un modelo correspondiente a un vehículo de la empresa Zytel. El objetivo principal es poder realizar simulaciones con dicho modelo para después comparar los resultados obtenidos en estas simulaciones con los que resultarían de un ensayo práctico con el vehículo real. Para ello se necesita un modelo que represente fielmente al prototipo real.

1.3 El Vehículo

El modelo del vehículo con el que se va a trabajar a lo largo de este Trabajo de Fin de Grado corresponde a un prototipo real. El vehículo se encuentra actualmente en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza (EINA), exactamente en una de las naves del edificio Agustín de Betancourt.

Para la obtención de este prototipo se partió de un vehículo comercial, el Suzuki Jimny, el cual era un vehículo con un motor de combustión interna. Este vehículo se transformó en un vehículo eléctrico sustituyendo el motor de combustión interna por un motor eléctrico, así como todos los elementos de transmisión y auxiliares necesarios para el correcto funcionamiento del vehículo. También se cambiaron elementos mecánicos como por ejemplo ejes o frenos y se reformó el chasis. Para dejar sitio a las baterías se quitaron los asientos traseros del vehículo. Para aumentar la autonomía se colocaron baterías en el exterior del vehículo, situadas en ambos laterales y en la parte trasera.

El resultado de esta reforma es un vehículo eléctrico de altas prestaciones, ya que posee características superiores a los vehículos eléctricos de la actualidad, como por ejemplo mayor potencia y autonomía o capacidad para superar pendientes más pronunciadas.

1.4 Trabajo previo

Para la realización de este trabajo han resultado de gran ayuda los siguientes proyectos realizados con anterioridad:

- Trabajo de Fin de Grado: Modelización y simulación de un vehículo eléctrico de altas prestaciones. Autor: Javier Ramón Miranda. Director: Emilio Larrodé Pellicer. Realizado en Zaragoza en Septiembre de 2014.
- Proyecto de Fin de Carrera de Ingeniería Industrial: Simulación de vehículo eléctrico para la optimización de su comportamiento. Autor: Juan Alberto Liarte Marín. Director y ponente: Emilio Larrodé Pellicer. Realizado en Zaragoza en Marzo de 2010.

En el primer documento se expone paso a paso como se ha construido el modelo del vehículo que se va a utilizar en este Trabajo de Fin de Grado. Este trabajo ha resultado de vital importancia ya que permite conocer exactamente qué subsistemas forman el modelo, así como las propiedades que lo definen.

El segundo proyecto lleva a cabo distintas simulaciones de otro vehículo eléctrico, el Gorila EV de la empresa Zytel Automoción S.L., utilizando el mismo software que se empleará en el presente Trabajo de Fin de Grado, ADAMS/Car. Como anexo, este documento posee un pequeño manual de uso del programa, por lo que ha resultado de gran utilidad a la hora de empezar a trabajar con el software.

1.5 Descripción del Problema

1.5.1 Condiciones iniciales

Para cumplir los objetivos propuestos se parte de una situación inicial en la que se tiene la modelización del vehículo en el programa ADAMS/Car.

Se deberá diseñar un circuito real sobre el que se realizará la simulación para caracterizar el comportamiento del vehículo en orden de marcha.

Una vez realizada la simulación se representarán las características más significativas del vehículo durante el recorrido. Se simularán diversas variantes para observar el comportamiento del vehículo en distintas situaciones.

1.5.2 ADAMS/Car

Tanto para el diseño del circuito como para la simulación en el mismo del vehículo se utilizará el programa ADAMS/Car, de la compañía MSC Software Corporation.

Este software permite el diseño y modelado de los distintos componentes de un vehículo para posteriormente ensamblarlos creando el vehículo completo. También ofrece la oportunidad de simular el vehículo, ya sea en un circuito cerrado o en un tramo determinado, o realizar pruebas sobre alguno de sus sistemas por separado para analizar su comportamiento.

El programa consta de dos modos distintos de trabajo: Template Builder y Standard Interface:

Template Builder

Este modo permite crear o modificar plantillas de los componentes que forman cada subsistema, como por ejemplo el muelle de una suspensión.

Estas plantillas definen la topología de cada componente. Son representaciones genéricas de los elementos por lo que pueden utilizarse en diferentes vehículos. Para adaptar la plantilla a un componente determinado será necesario introducir sus datos geométricos y los parámetros que definen sus propiedades.

Standard Interface

En este modo no se puede trabajar con una plantilla por sí sola, por lo que se deben crear subsistemas y ensamblajes.

Al crear un subsistema se referencian las plantillas de los componentes que lo forman y que se han creado anteriormente en el modo Template Builder. Un ejemplo de subsistema es el sistema de transmisión o las suspensiones.

Un ensamblaje es una agrupación de subsistemas que, una vez unidos, forman un sistema que se puede simular. Este sistema puede ser el vehículo completo o sólo parte de él, como por ejemplo el sistema de suspensión formado por el sistema de dirección y las suspensiones del vehículo.

La simulación del vehículo completo se puede realizar llevando a cabo diferentes situaciones o maniobras que dispone el programa, como cambios de carril o frenado en curva, o diseñando un circuito que recorrerá el vehículo.

Una vez realizada la simulación se puede reproducir el análisis como si fuera un vídeo o representar gráficamente cualquier parámetro de interés medido durante el análisis, como por ejemplo la velocidad o la aceleración.

1.5.3 Metodología

El método de trabajo consistirá en la simulación del modelo del vehículo y cálculo teórico de sus prestaciones para, posteriormente, poder comparar los resultados obtenidos con los resultados experimentales, obtenidos con las pruebas realizadas con el vehículo real.

La primera tarea a llevar a cabo será estudiar el comportamiento del vehículo eléctrico dependiendo de la situación ensayada, de esta forma se conocerá como debe reaccionar el vehículo cuando se realice cada simulación. También será necesario informarse de los antecedentes del proyecto, puesto que debe conocerse cómo se ha modelado el vehículo y cuáles son las propiedades y características de sus componentes. Esto es muy importante ya que si se desea realizar algún cambio sobre el vehículo debe saberse qué componente se puede cambiar y de qué forma se puede aplicar dicho cambio sobre el modelo.

Lo siguiente que deberá hacerse será familiarizarse con el programa ADAMS/Car, puesto que es un programa que ofrece múltiples opciones de trabajo. Lo más importante será el estudio de las diferentes alternativas de diseño de carreteras y los distintos modos de simulación. También será necesario conocer la forma de analizar y representar los resultados obtenidos en cada simulación.

Conocido el funcionamiento del programa se procederá al análisis de las prestaciones del vehículo. Se crearán diferentes situaciones de ensayo en las que se analizará el comportamiento del vehículo y se comparará con los resultados experimentales y los cálculos teóricos obtenidos.

El siguiente paso será el de simular un recorrido real, para ello se deberá diseñar una carretera que se acerque todo lo posible al circuito real. Una vez construido el circuito se simulará el vehículo y se analizarán y validarán los resultados obtenidos.

1.6 Estructura de la Memoria

En los apartados de esta memoria se explica detalladamente el trabajo realizado. Se empieza por un reconocimiento de la situación inicial del modelo con el que se va a trabajar.

A continuación, se llevan a cabo una serie de ensayos sobre el vehículo con el objetivo de determinar si el modelo se aproxima lo suficiente al prototipo real. Para analizar el modelo se han simulado distintas situaciones de conducción, creando las carreteras necesarias para realizar estos análisis. Estas simulaciones se realizan también con una variante más pesada del modelo, con el fin de analizar la influencia de la masa en las prestaciones del vehículo.

Posteriormente, se detalla paso a paso el procedimiento llevado a cabo para la creación de un circuito real sobre el que simular el modelo virtual, empezando por una justificación de la elección del recorrido que se ha diseñado.

El siguiente paso consiste en la simulación sobre el circuito creado de las dos variantes del modelo utilizadas en los ensayos previos, analizando y comparando los resultados obtenidos para ambas variantes del vehículo.

El último apartado de esta memoria recoge las conclusiones y posibilidades de continuación de este Trabajo de Fin de Grado.

Finalmente, los anexos que acompañan a esta memoria recogen información detallada acerca de la creación de carreteras y de archivos de control de velocidad, necesarios para llevar a cabo las simulaciones, así como un resumen de las propiedades del modelo del vehículo utilizado.

2 Ensayos previos

En primer lugar, se deberán realizar una serie de pruebas y ensayos simples sobre el modelo del vehículo, ya que, antes de llevar a cabo la simulación del vehículo en un recorrido real y analizar su comportamiento, es necesario asegurarse de que el modelo virtual es lo más parecido posible al prototipo real. De no ser así, los resultados de los análisis obtenidos en la simulación no coincidirían con los obtenidos en las pruebas de comportamiento real. Si esto sucediera, los resultados no serían útiles, ya que no representarían el comportamiento del vehículo.

Los ensayos y simulaciones del vehículo se realizarán en el modo de trabajo Standard Interface del programa ADAMS/Car. Este modo de trabajo permite realizar análisis del sistema de suspensión, de los neumáticos o del vehículo completo. A lo largo de este Trabajo de Fin de Grado se realizarán simulaciones y análisis únicamente del vehículo completo. En el modo de trabajo Standard Interface se lleva a cabo también la creación de carreteras, ya sean tramos aislados o circuitos cerrados.

2.1 Situación inicial

Antes de realizar cualquier ensayo es necesario conocer la situación inicial del modelo. El ensamblaje del vehículo completo está compuesto por la unión de los distintos subsistemas que lo forman. A su vez, cada subsistema consta de: referencias a las plantillas que definen la topología de cada uno de sus componentes, datos de diseño y geometría de los componentes y referencias a archivos de propiedades que definen las características de cada componente. Por lo que para conocer el estado del modelo se deberá saber exactamente qué subsistemas forman el ensamblaje del vehículo completo así como las propiedades y características de los componentes que los forman.

Al crear o modificar plantillas, subsistemas o ensamblajes se generan archivos externos al programa que son editables con un procesador de textos. De esta forma, si se desea realizar cualquier cambio sobre el modelo se dispone de dos opciones: modificar la plantilla, subsistema o ensamblaje dentro del programa o simplemente modificar el archivo externo generado.

Si se realizan los cambios dentro del programa se deberán utilizar los modos Template Builder o Standard Interface dependiendo de dónde se realicen dichos cambios. En el modo Template Builder únicamente se puede trabajar con plantillas mientras que en el modo Standard Interface se trabaja con subsistemas y ensamblajes.

Si por otra parte se realizan los cambios directamente sobre los archivos externos generados, únicamente hay que localizar el archivo que se desea modificar y aplicar los cambios correspondientes.

Con lo descrito anteriormente, se visualizará en el programa tanto el ensamblaje del vehículo completo como los subsistemas que lo forman por separado. De esta forma se podrá comprobar que la topología de los componentes es la correcta. Después se localizarán los archivos externos generados, identificando los diferentes archivos de propiedades, geometría, subsistemas y ensamblajes. Las propiedades del vehículo se muestran en el Anexo III.

En la figura 1 se muestra el modelo del vehículo en el programa ADAMS/Car.

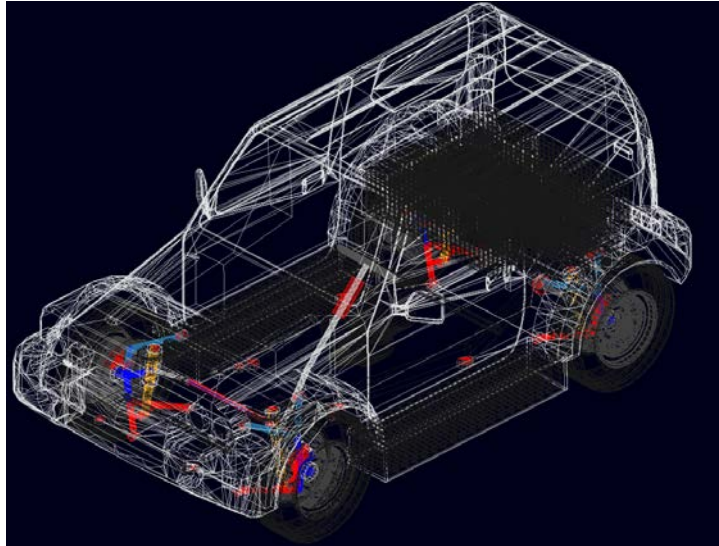


Figura 1. Modelo virtual en ADAMS/Car

Una vez conocida la situación inicial e identificados todos los archivos que se pueden modificar, se pueden llevar a cabo los primeros ensayos.

2.2 Creación de carreteras

Aunque el programa ADAMS/Car permite realizar análisis del modelo en unas situaciones establecidas, como cambios de carril o análisis de estabilidad, para llevar a cabo los ensayos se crearán tramos de carretera donde posteriormente se simulará el modelo del vehículo.

Las carreteras se crearán con la herramienta Road Builder, disponible en el modo de trabajo Standard Interface. Esta herramienta permite la creación de carreteras 3D, ya sea por tramos o introduciendo los puntos de su trayectoria como coordenadas de los ejes cartesianos. Además se deberá indicar la anchura de la carretera, su coeficiente de fricción y el ángulo de peralte si lo tuviera. La herramienta Road Builder se explica con más detalle en el Anexo I.

Se crearán un tramo recto, uno curvo y un circuito cerrado sobre los que realizar los ensayos. Tanto los tramos como el circuito cerrado medirán 12 metros de ancho y no tendrán peralte.

2.2.1 Tramo recto

Se creará un tramo recto lo suficientemente largo para poder realizar ensayos de aceleración. De esta forma se comprobará la aceleración máxima del modelo para ver si coincide con los datos esperados. El tramo recto tendrá una longitud de 600 metros, se puede observar en la figura 2.

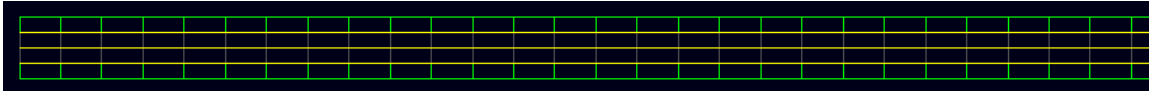


Figura 2. Tramo recto

2.2.2 Tramo curvo

Este tramo se construirá para comprobar la estabilidad del modelo en el paso por curva, calculando la velocidad máxima a la que el vehículo podrá realizar dicha curva sin perder estabilidad. Posteriormente se comprobará si esa velocidad coincide con la esperada para el modelo real. La curva tendrá 50 metros de radio y supondrá un giro de 180°, esto se puede observar en la figura 3.

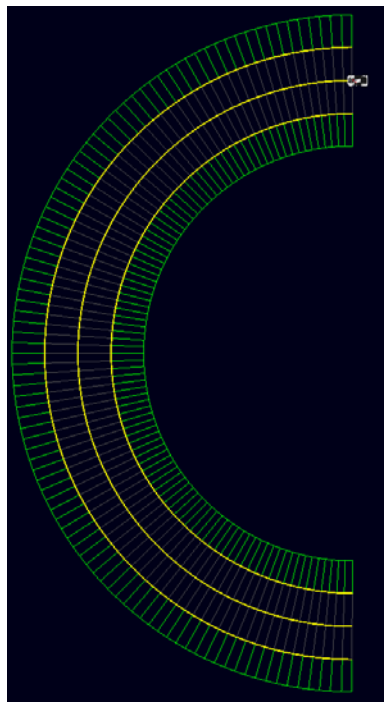


Figura 3. Tramo curvo

2.2.3 Circuito cerrado

Se creará un circuito cerrado en forma de óvalo para comprobar que el comportamiento del vehículo en un circuito completo es el esperado. El circuito constará de dos tramos rectos de 400 metros de longitud y dos tramos curvos de 50 metros de radio, como se puede observar en la figura 4.

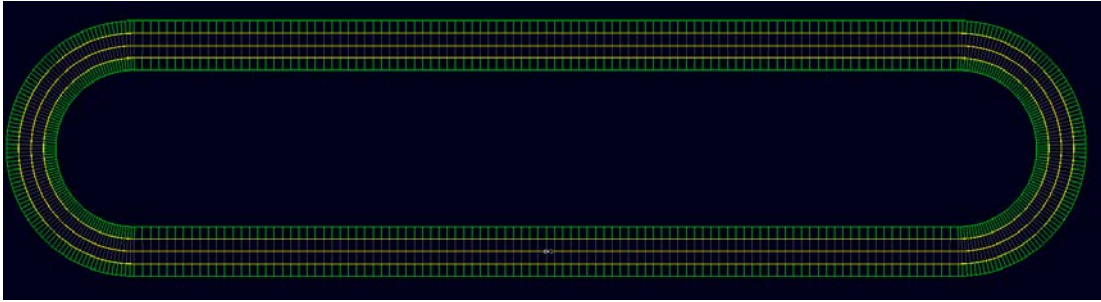


Figura 4. Circuito cerrado

2.3 Análisis y Resultados

Una vez creadas las carreteras se realizará la simulación. Se analizarán dos situaciones distintas del pavimento: en buenas condiciones de adherencia y en condiciones desfavorables, donde la adherencia disminuye. Esto resulta muy útil, ya que se puede observar si hay diferencias significativas en el comportamiento del vehículo cuando las condiciones de la carretera no son las ideales, por ejemplo que haya algún tipo de sustancia que disminuya el rozamiento como agua, polen o aceite.

Para cambiar las condiciones de adherencia en el programa ADAMS/Car bastará con cambiar el coeficiente de fricción de la carretera. En la situación con un pavimento en buenas condiciones se tiene un coeficiente de 0,9 mientras que para la situación en condiciones desfavorables se ha disminuido hasta 0,75.

También se llevarán a cabo simulaciones con dos variantes del prototipo. Primero se analizarán las prestaciones del modelo tal y como se encuentra en la situación inicial y después se aumentará el peso para estudiar su comportamiento. De esta forma se podrá observar la influencia que tiene la masa sobre las prestaciones del vehículo. Este análisis es útil para, por ejemplo, valorar si es mejor introducir más baterías en el vehículo y que sea capaz de almacenar más energía, o por otra parte es mejor que la masa sea menor para que sea necesaria menos energía para mover el vehículo.

El modelo inicial posee un total de 120 baterías con una masa de 672 kg, siendo 2.500 kg la masa total del vehículo. La segunda variante tendrá una masa de 2.800 kg, lo que supondría añadir aproximadamente 50 baterías más.

2.3.1 Tipo de análisis realizado

De todos los tipos de análisis que se pueden realizar en el programa ADAMS/Car se ha seleccionado un análisis de vehículo completo, concretamente el tipo de análisis 3D Road. La elección de este tipo de análisis se basa en que con él se puede simular el modelo en carreteras 3D como las creadas anteriormente. Además, permite elegir cómo va a ser el control del vehículo durante el recorrido, pudiendo ser diseñado por el usuario.

Los parámetros que se deben introducir para llevar a cabo el análisis son los siguientes:

- **Full - Vehicle Assembly:** Ensamblaje del vehículo completo que se desea analizar.
- **Output prefix:** Nombre de la simulación, servirá para identificar los archivos que genera el programa como resultado del análisis.
- **End Time:** Tiempo que se desea que dure la simulación.
- **Number Of Steps:** Número de pasos en los que se desea dividir el tiempo de simulación. El programa rellena esta casilla automáticamente una vez que se introduce el tiempo de simulación, pero se puede cambiar si se desea.
- **Mode of Simulation:** Tipo de simulación que se desea realizar. Se puede elegir entre crear archivos de salida con los resultados del análisis, representar el resultado como una animación o ambas cosas a la vez.
- **3D Road Data File:** Archivo de la carretera 3D sobre la que se desea realizar la simulación.
- **Initial Velocity:** Velocidad que lleva el vehículo al iniciar la simulación. Se pueden elegir las unidades en las que se introduce y debe ser distinta de cero.
- **Initial Gear Position:** Marcha inicial del vehículo al comenzar la simulación. Al tratarse de un vehículo eléctrico deberá ser siempre la primera.
- **Speed Control:** Tipo de control de velocidad. El programa ofrece dos opciones: aplicar una aceleración longitudinal constante a partir del tiempo de simulación indicado o mediante un archivo DCD para el control de la velocidad durante todo el circuito. Los archivos DCD se explican con mayor detalle en el Anexo II.

La figura 5 muestra las ventanas en las que se deben introducir dichos parámetros.

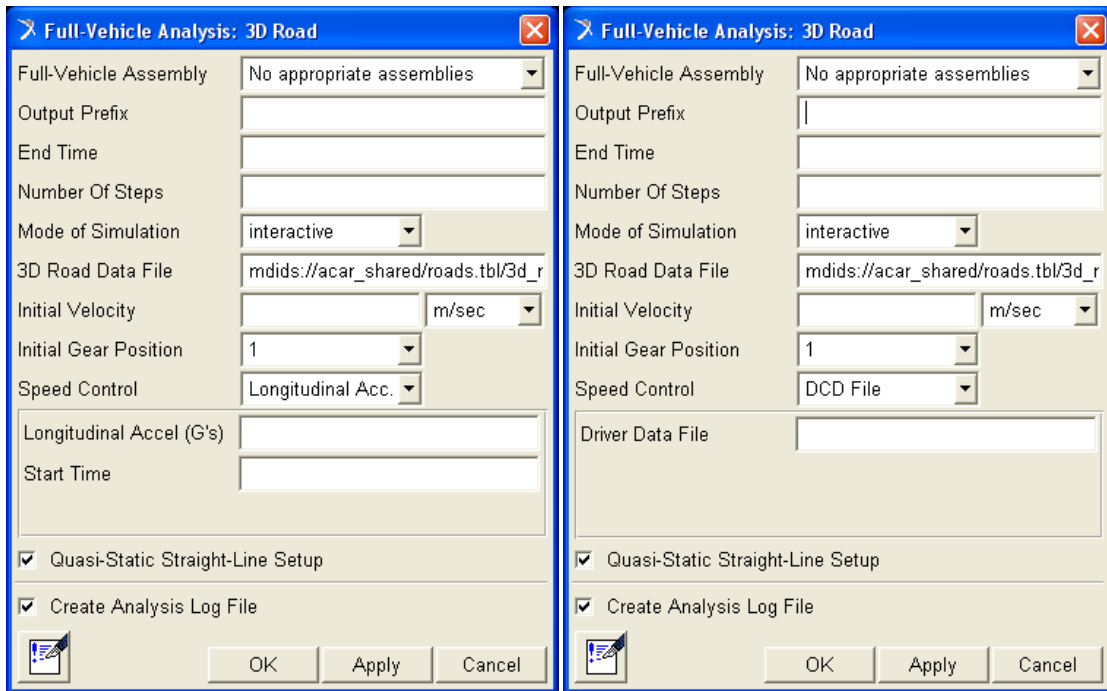


Figura 5. Ventanas del análisis 3D Road

El tipo de control de velocidad utilizado, tanto para los ensayos como para la simulación en el vehículo real, será mediante archivos DCD. Estos archivos están incluidos en el Anexo II.

2.3.2 Análisis en tramo recto

El primer análisis que se realizará en este tramo será para comprobar la aceleración del vehículo. Para ello se creará un archivo DCD en el que se controlará la aceleración longitudinal en función de la distancia recorrida (recta_acc.dcd). En este archivo se indica que el vehículo deberá mantener una aceleración de 10 m/s^2 desde el inicio de la simulación hasta el final del tramo. En este análisis también podremos observar la velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo.

En la figura 6 se muestra la evolución de la velocidad en función de la distancia recorrida para ambas variantes del vehículo.

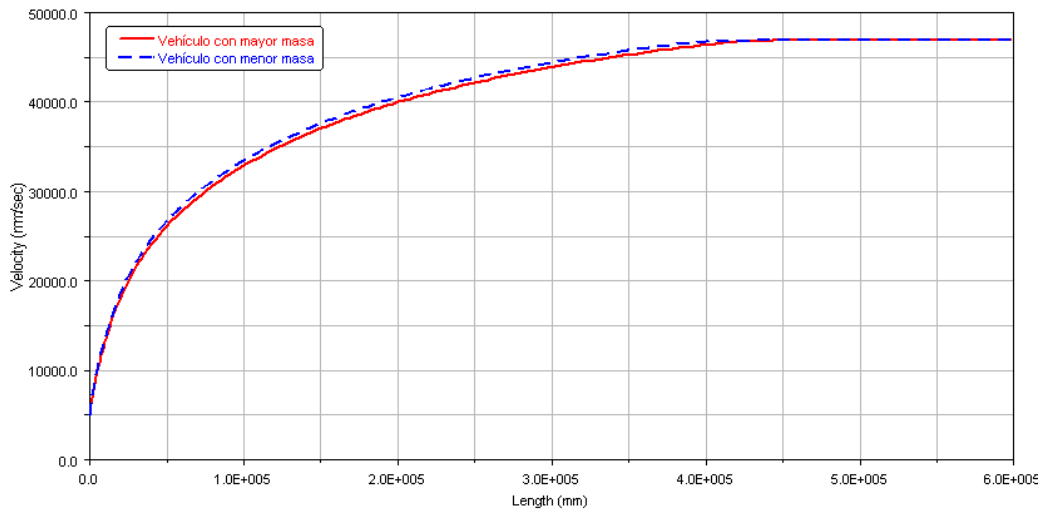


Figura 6. Comparación velocidades en buenas condiciones

Como se puede observar, ambas variantes del vehículo alcanzan la misma velocidad máxima, aproximadamente 47 m/s (169 km/h), pero la variante del modelo más ligero llega antes a esa velocidad máxima.

La figura 7 muestra la aceleración longitudinal del vehículo inicial, así como las revoluciones por minuto del motor.

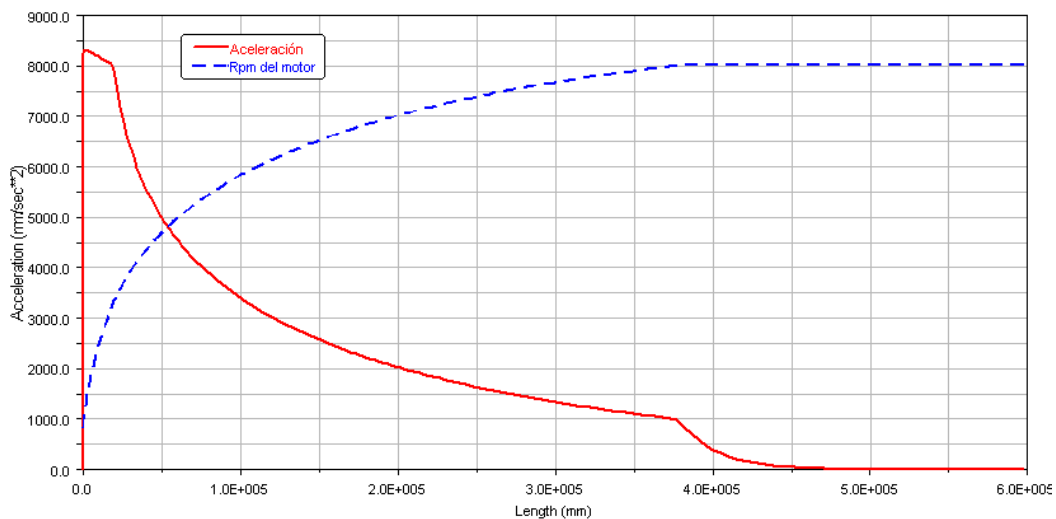


Figura 7. Aceleración del vehículo ligero en buenas condiciones

Se puede observar que la aceleración no llega a los 10 m/s² que se había indicado en el archivo de control, sino que alcanza un máximo de 8,3 m/s² aproximadamente, esta es la aceleración máxima que puede alcanzar esta variante del vehículo. Una vez alcanzado este máximo, la aceleración empieza a disminuir conforme aumentan las revoluciones por minuto del motor.

Antes de llegar a cero, la aceleración atraviesa un punto donde disminuye de forma más brusca, debido a que el motor alcanza las 8.000 rpm, que es el valor máximo de revoluciones para el que está definido el mapa motor.

Para el modelo del vehículo más pesado se obtiene una aceleración máxima menor, aproximadamente $7,8 \text{ m/s}^2$, como se comprueba en la figura 8. La evolución de la aceleración en esta variante es igual que para el modelo más ligero, observándose el mismo descenso al llegar a las 8.000 rpm.

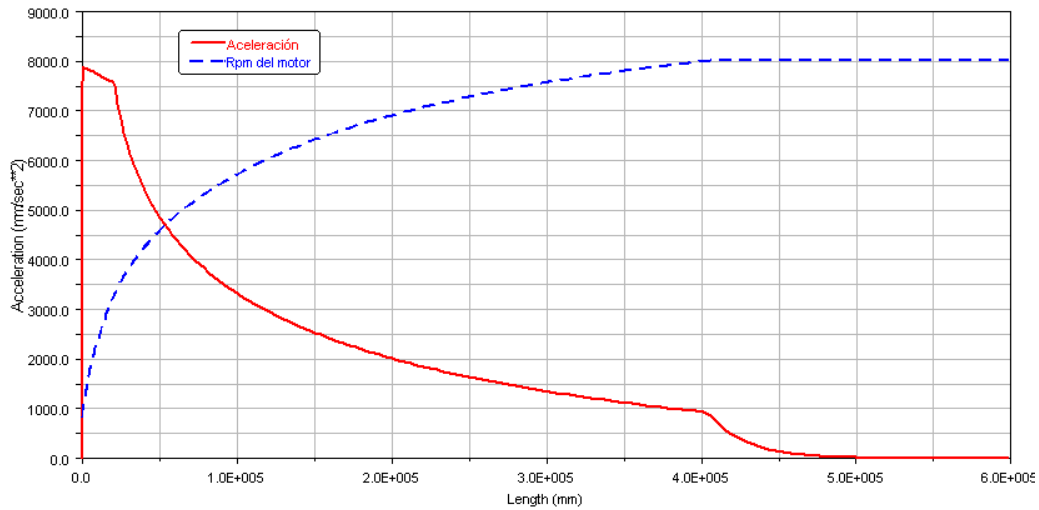


Figura 8. Aceleración del vehículo de mayor masa en buenas condiciones

En la figura 9 se representa la aceleración de los dos modelos en función de las revoluciones por minuto del motor, donde se puede comprobar la caída de la aceleración al llegar a las 8.000 rpm. También se observa la diferencia en la aceleración de ambas variantes del vehículo, siendo mayor la aceleración del modelo más ligero, lo que explica que este modelo alcance antes la velocidad máxima.

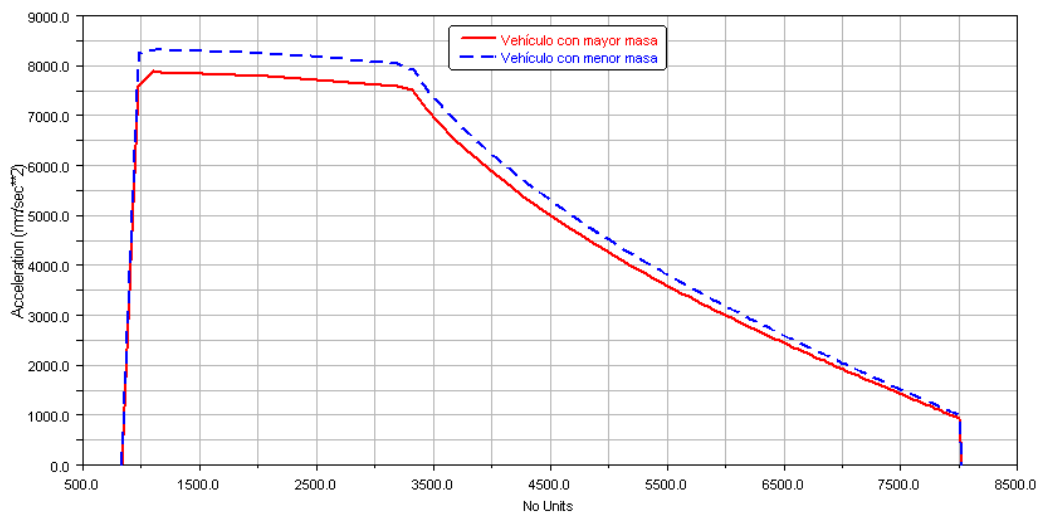


Figura 9. Aceleración frente a rpm de los dos modelos

En la figura 10 se muestra un detalle de la zona de aceleración máxima, donde se puede comprobar su valor para las dos variantes de forma más exacta.

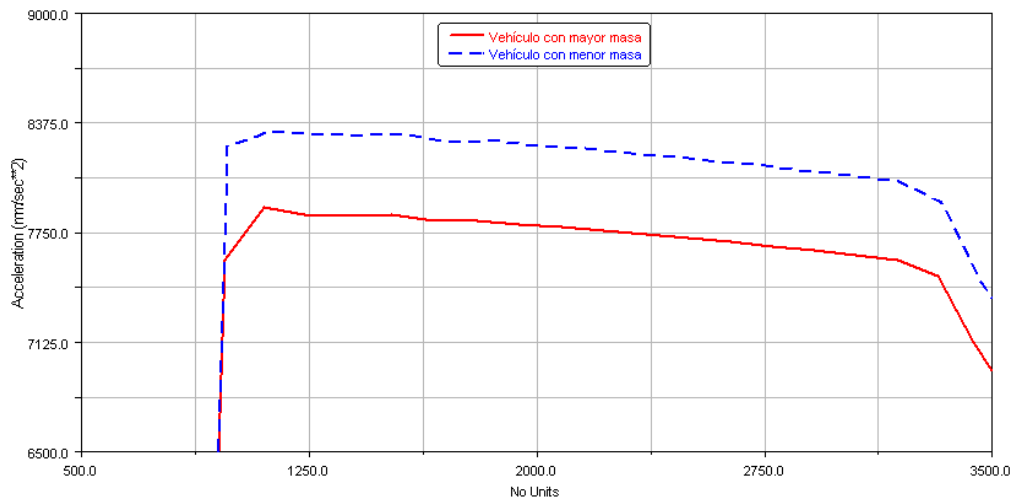


Figura 10. Detalle de aceleración máxima de los dos modelos

Una vez analizada la situación en pavimento en buenas condiciones se procede a realizar la simulación en condiciones desfavorables. En las figura 11 se muestra la evolución de la velocidad a lo largo de la recta para los dos modelos.

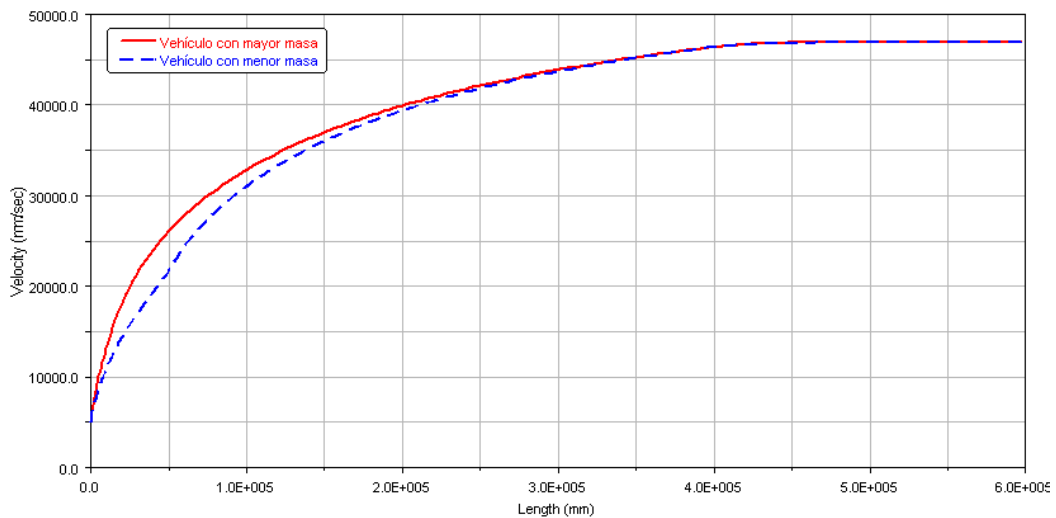


Figura 11. Comparación velocidades en condiciones desfavorables

Se observa que alcanzan la misma velocidad máxima que en la situación del pavimento en buenas condiciones pero, en los primeros instantes, la variante con mayor masa lleva una velocidad mayor.

La figura 12 muestra la aceleración longitudinal del vehículo más ligero y las revoluciones por minuto del motor.

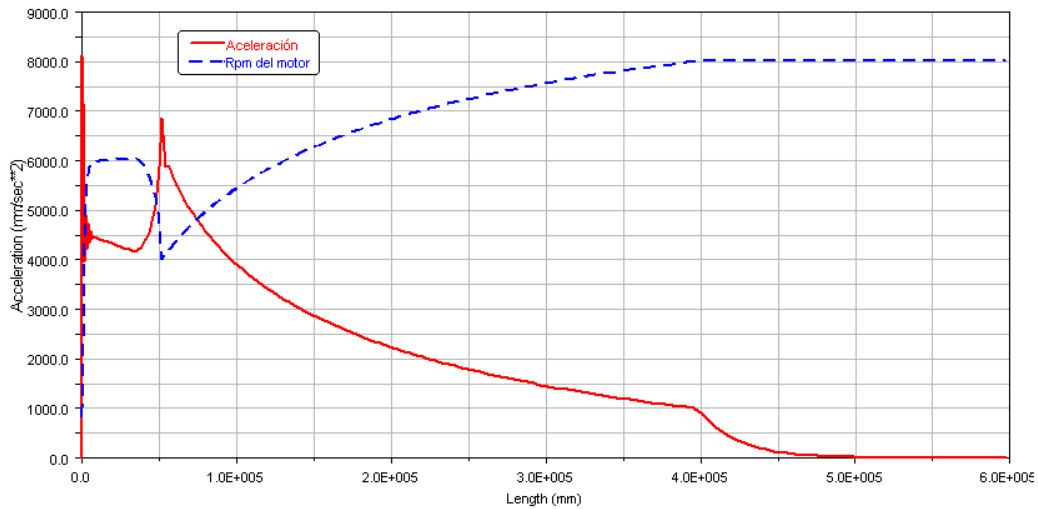


Figura 12. Aceleración del vehículo de menor masa en condiciones desfavorables

Se observa que en el instante inicial, se produce un pico en la aceleración, que alcanza su valor máximo, pero luego disminuye hasta los $4,5 \text{ m/s}^2$ aproximadamente. Este valor se mantiene unos instantes para después crecer hasta alcanzar un nuevo pico de 7 m/s^2 . Una vez alcanzado este pico, vuelve a disminuir de forma similar a como la hacía en la situación del pavimento en buenas condiciones.

Estas variaciones de la aceleración en los primeros instantes son debidas a que, al tener el pavimento una menor adherencia, la tracción del vehículo es peor, por lo que se produce un pequeño deslizamiento del neumático. Esto provoca que el vehículo tarde más en alcanzar la velocidad máxima, como se ha visto anteriormente.

La evolución de la aceleración para el vehículo más pesado se muestra en la figura 13.

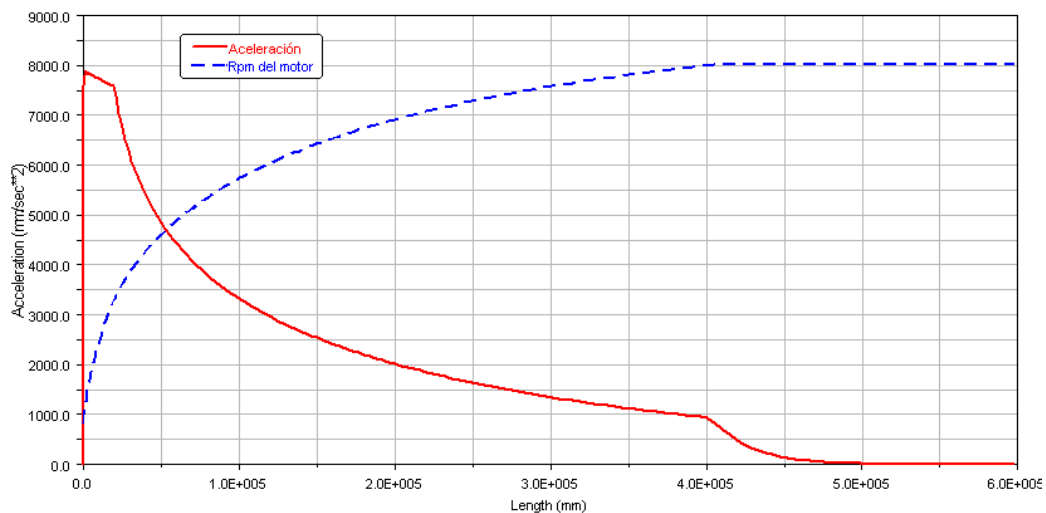


Figura 13. Aceleración del vehículo con mayor masa en condiciones desfavorables

Se puede observar que para esta variante no se producen variaciones de la aceleración como ocurría con el modelo más ligero, alcanza el valor máximo de $7,8 \text{ m/s}^2$ y después disminuye de igual forma que en la situación en buenas condiciones del pavimento. Esto se debe al hecho de que, al tener un mayor peso, el contacto de los neumáticos con el pavimento es mejor, lo que hace que la tracción del vehículo sea mejor que la del modelo con menor masa. Esto provoca que el vehículo tenga mejor aceleración y, en los primeros instantes, mayor velocidad.

2.3.3 Análisis en tramo curvo

En este tramo se comprobará la estabilidad del vehículo a su paso por curva. En una simulación, cuando el vehículo patina o pierde contacto con la carretera se produce un error en el cálculo que está realizando el programa y se corta el análisis. Para calcular la velocidad máxima a la que el vehículo puede tomar la curva sin perder estabilidad se empezará simulando el tramo a una velocidad alta, 25 m/s (90 km/h), y posteriormente se irá disminuyendo hasta encontrar la velocidad límite a la que no se produce un error en el cálculo del programa. Esto se controlará mediante el archivo `curva_rapida.dcd`. Para la situación en condiciones desfavorables el procedimiento será el mismo, utilizando el archivo `curva_desfavorable.dcd`.

En las figuras 14 a 17 se puede observar el resultado del primer análisis del vehículo con menor masa para la velocidad de 25 m/s . En la figura 14 se muestra la situación final del vehículo una vez que ha perdido estabilidad y se ha producido un error en el cálculo.

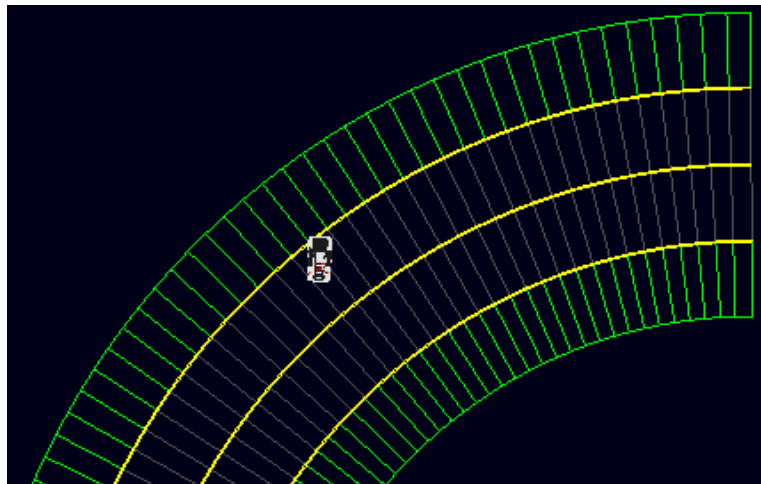


Figura 14. Situación final de simulación con error

En las figuras 15, 16 y 17 se representan la velocidad, aceleración longitudinal y aceleración lateral respectivamente, en función de la distancia recorrida.

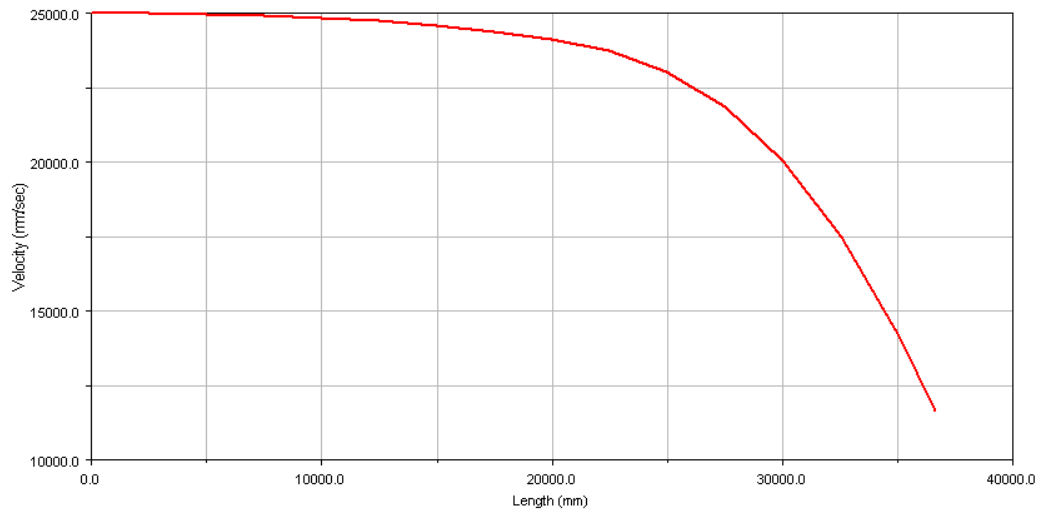


Figura 15. Velocidad en simulación con error

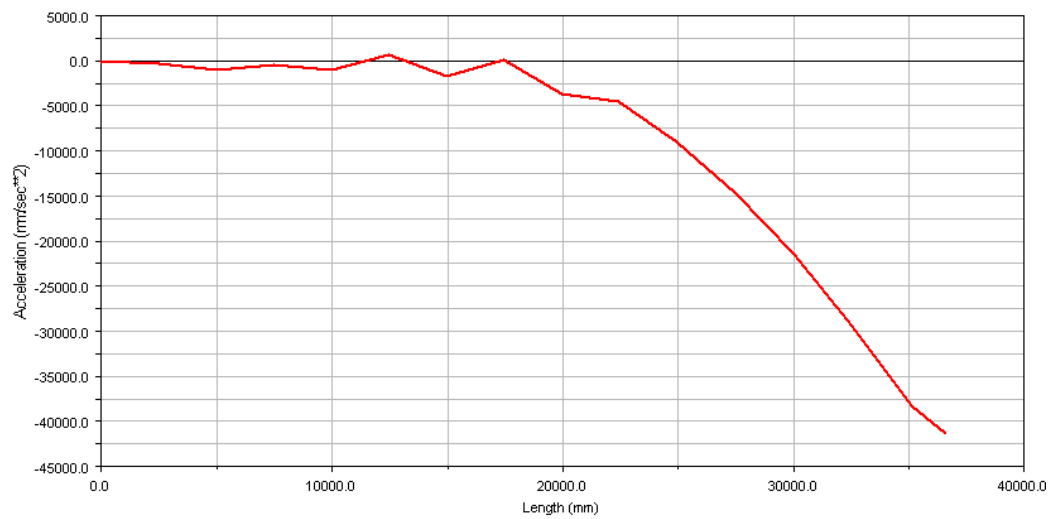


Figura 16. Aceleración longitudinal en simulación con error

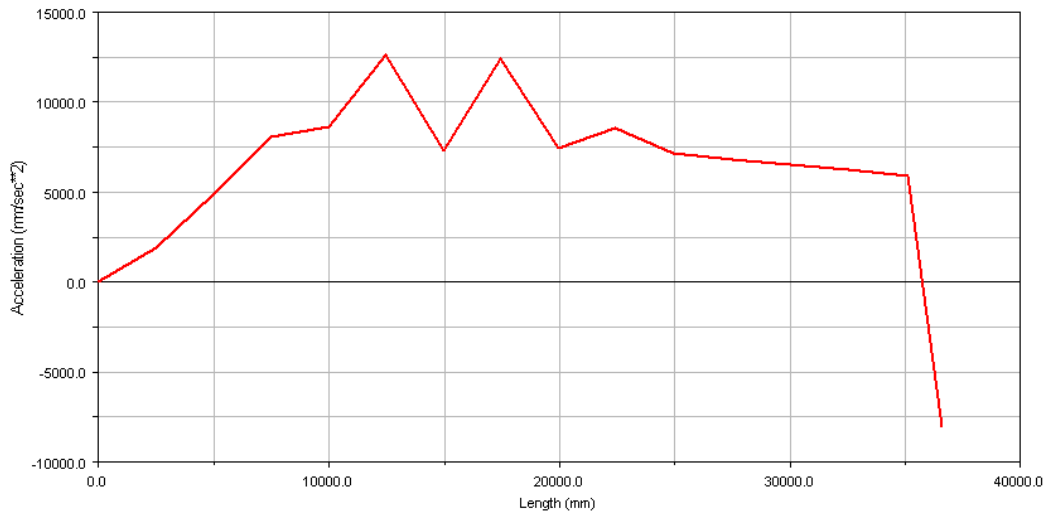


Figura 17. Aceleración lateral en simulación con error

Se puede observar que, al entrar en la curva, la aceleración lateral aumenta rápidamente alcanzando valores demasiado altos, esto hace que el vehículo derrape. En este momento es cuando se produce el error en la simulación, provocando que tanto las aceleraciones como la velocidad del vehículo disminuyan bruscamente y se corte el análisis.

Tras realizar varias simulaciones se comprueba que la velocidad límite a la que el vehículo con menor masa puede tomar la curva es de 20 m/s (72 km/h). Para la variante del vehículo de mayor peso, la velocidad máxima es de 19 m/s (68,4 km/h). Esto se representa en la figura 18.

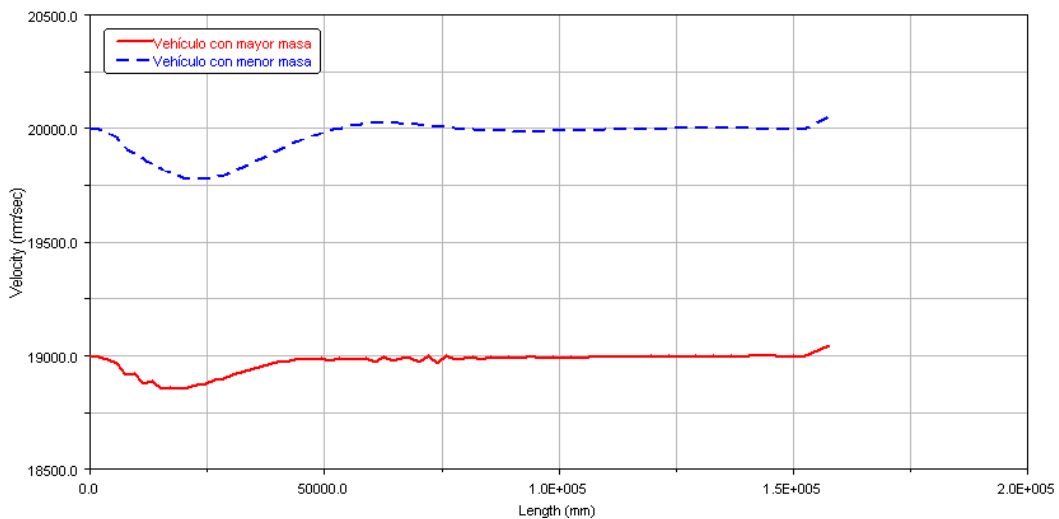


Figura 18. Comparación velocidades en curva en buenas condiciones

La velocidad límite del vehículo más pesado es menor, ya que, al tener mayor masa, el valor de la fuerza centrífuga que sufre al pasar por la curva es mayor. Para reducir esta fuerza es necesario disminuir la velocidad de paso por curva.

La variación de velocidad que se observa en los primeros instantes es debida a que, al entrar en la curva, parte de la energía utilizada para mover el vehículo se emplea en realizar el cambio de dirección, por lo que la velocidad del vehículo desciende ligeramente hasta que recibe más energía para mantener la velocidad constante. Esto se comprueba en las figuras 19 y 20, donde se muestra la aceleración longitudinal para la variante más ligera y la de mayor masa respectivamente.

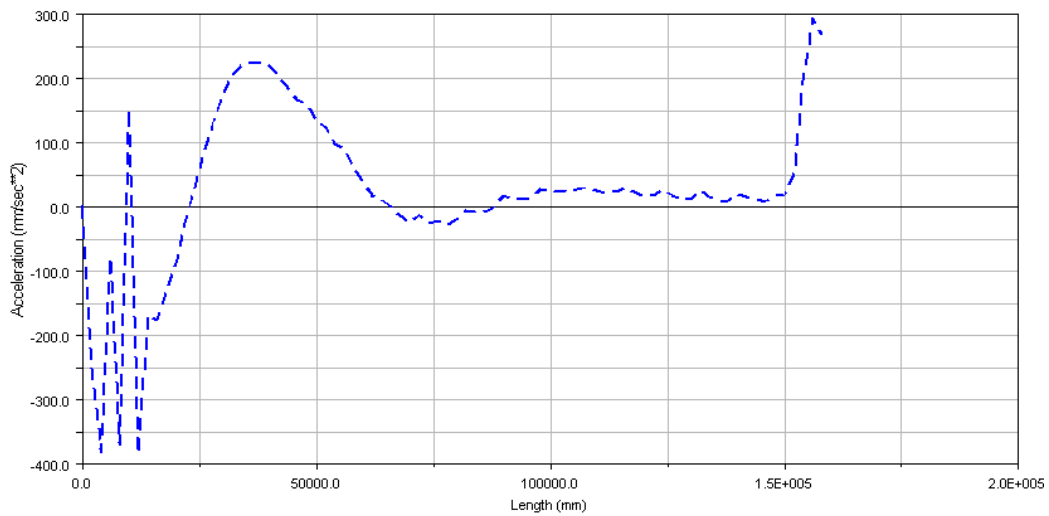


Figura 19. Aceleración longitudinal en curva del modelo con menor masa en buenas condiciones

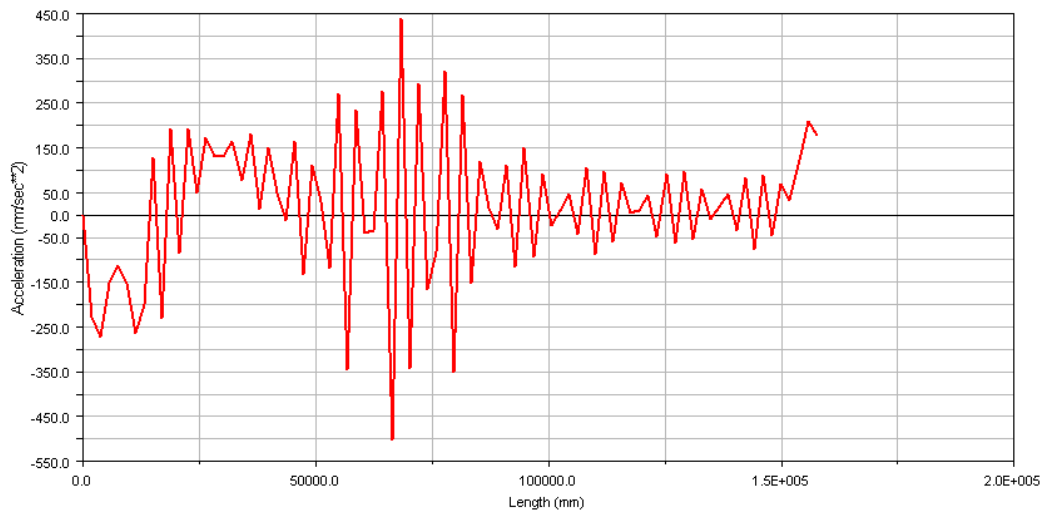


Figura 20. Aceleración longitudinal en curva del modelo con mayor masa en buenas condiciones

Se puede observar que son valores pequeños de aceleración, ya que se emplea únicamente para mantener la velocidad constante. Estos valores son ligeramente superiores para el modelo más pesado, ya que al tener mayor masa se necesita más energía para moverlo.

Por otro lado, se observa que para la variante más ligera, se producen variaciones de la aceleración en los primeros instantes pero luego se mantiene aproximadamente constante. Sin embargo, para la variante de mayor masa se observan variaciones a lo largo de todo el recorrido, siendo menores al final de la curva.

Esta diferencia en las variaciones de la aceleración se observa en la comparación de velocidades, mientras que para el vehículo más pesado se observan unos pequeños picos, la evolución de la velocidad del vehículo más ligero sufre una variación más suave.

La figura 21 muestra la aceleración lateral a lo largo de la curva para las dos variantes del modelo.

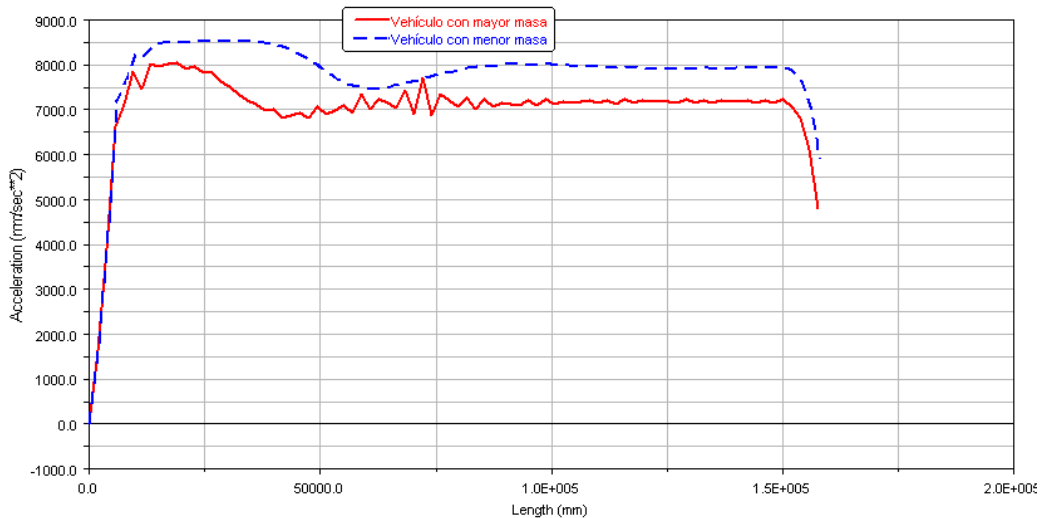


Figura 21. Comparación aceleración lateral en curva en buenas condiciones

Esta aceleración es mayor para el vehículo más ligero, ya que realiza la curva a una velocidad más alta que el modelo más pesado. Como sucedía con la aceleración longitudinal, la evolución de la aceleración lateral del modelo con menor masa es más suave que la de la variante con mayor masa, en la que se observan más variaciones hasta alcanzar un valor aproximadamente constante.

Después de analizar las aceleraciones que sufre cada variante al pasar por la curva, se comprueba que un aumento en la masa del vehículo dificulta el paso por curva manteniendo una velocidad constante.

En la simulación del pavimento con menor adherencia se observa que la velocidad máxima para el modelo más ligero es de 18 m/s (64,8 km/h), la misma que para la variante con mayor masa, como se observa en la figura 22.

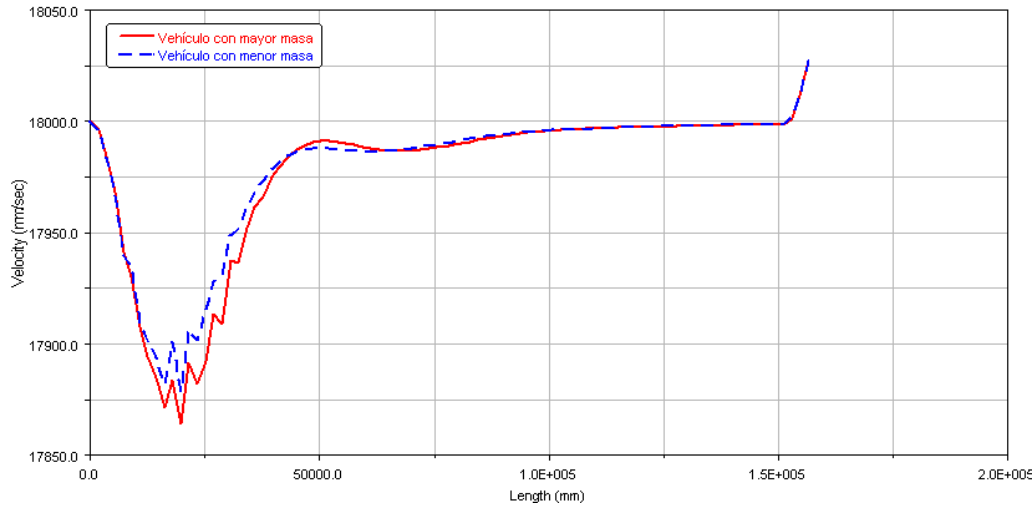


Figura 22. Comparación velocidades en curva en condiciones desfavorables

Cuando la adherencia del tramo es menor, la velocidad límite a la que los modelos pueden realizar la curva disminuye. Esto se debe a que en el paso por curva, debido a la aparición de la aceleración lateral, se produce un pequeño deslizamiento entre el neumático y el pavimento. Al disminuir la adherencia, este deslizamiento aumenta, lo que favorece que el vehículo patine y no pueda realizar la curva a la misma velocidad que si el pavimento estuviera en buenas condiciones.

Este efecto es menor en el vehículo de mayor masa, ya que, como sucedía en el ensayo de aceleración, al tener un peso mayor, el contacto con el pavimento es mejor, por lo que la tracción del vehículo también es mejor. Esto provoca que el descenso en la velocidad límite a la que se puede trazar la curva sea menor que el descenso que se observa en la variante más ligera.

En los primeros instantes se observa una pequeña variación de la velocidad, debida al cambio de dirección, como ocurría en la situación en buenas condiciones del pavimento.

Las figuras 23 y 24 muestran la comparación para las dos variantes de la aceleración longitudinal y lateral respectivamente.

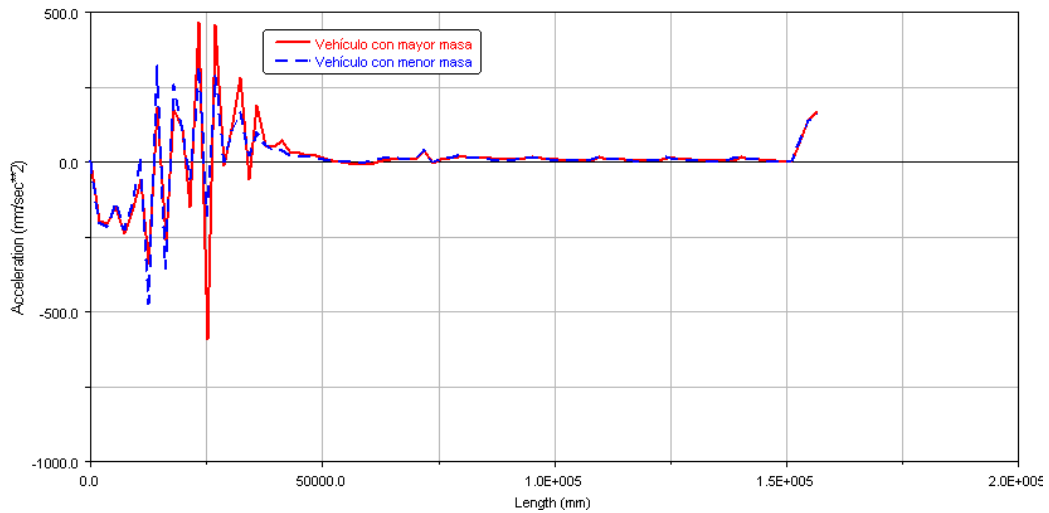


Figura 23. Comparación aceleración longitudinal en curva en condiciones desfavorables

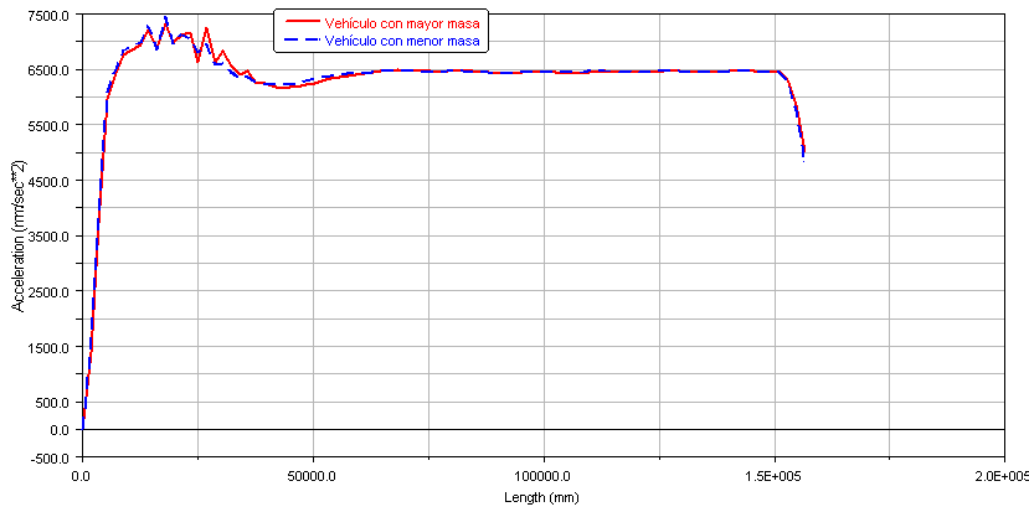


Figura 24. Comparación aceleración lateral en curva en condiciones desfavorables

Se puede observar que tanto la aceleración longitudinal como la aceleración lateral son muy similares para ambas variantes del modelo. Sufriendo variaciones al entrar en la curva, como sucedía en la situación del pavimento en buenas condiciones, hasta que el vehículo alcanza una situación estable en la que realiza la curva a velocidad constante.

2.3.4 Análisis en circuito cerrado

Finalmente se procederá a ensayar el vehículo en un circuito cerrado. Se realizará una vuelta al circuito para observar el comportamiento del vehículo en un circuito completo y no sólo en tramos aislados.

Para controlar el modelo en la simulación en pavimento en buenas condiciones se utilizará el archivo `circuito_cerrado.dcd`. El vehículo más ligero llevará una velocidad de 30 m/s en las rectas y de 20 m/s en las curvas, el modelo de mayor masa alcanzará la misma velocidad en las rectas pero las curvas las realizará a 19 m/s. Por otra parte, en la simulación en pavimento en condiciones desfavorables se utilizará el archivo `circuito_cerrado_desfavorable.dcd`. En este caso la velocidad en las curvas se reducirá hasta los 18 m/s para las dos variantes.

En la figura 25 se observa la evolución de la velocidad a lo largo del circuito en buenas condiciones de adherencia para las dos variantes, donde se puede observar que ambos modelos recorren el circuito tal y como se ha indicado en el archivo de control de velocidad.

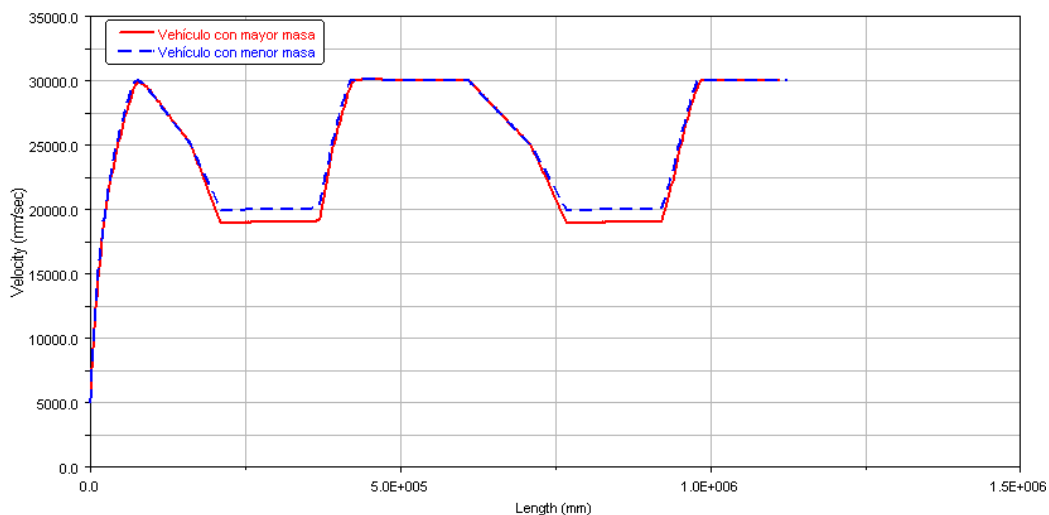


Figura 25. Comparación velocidades circuito cerrado en buenas condiciones

En la figura 26 se muestra la comparación de la aceleración longitudinal de cada modelo. Se puede observar la diferencia entre los picos de aceleración negativa de los dos modelos. Esta diferencia se debe a que el vehículo con mayor masa tiene que disminuir más la velocidad al llegar a las curvas, por lo que necesita una aceleración de frenado mayor.

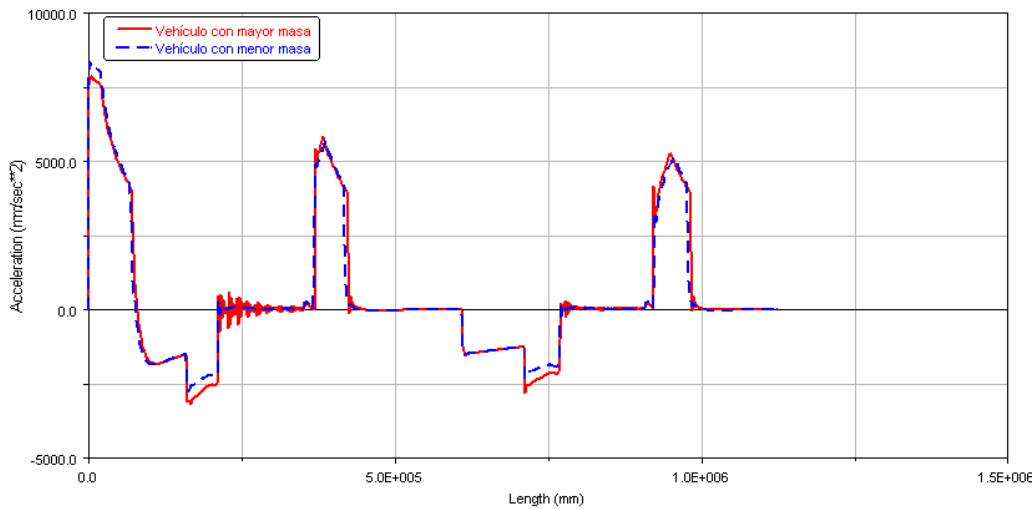


Figura 26. Comparación aceleración longitudinal circuito cerrado en buenas condiciones

La figura 27 muestra un detalle de uno de los picos de aceleración positiva de los dos modelos. En ella se observa que el vehículo más pesado recorre más distancia acelerando que el vehículo ligero. Esto también se debe a que el modelo con mayor masa realiza las curvas a menor velocidad, por lo que el aumento de velocidad al salir de la curva es mayor y le cuesta más alcanzar la velocidad del tramo recto.

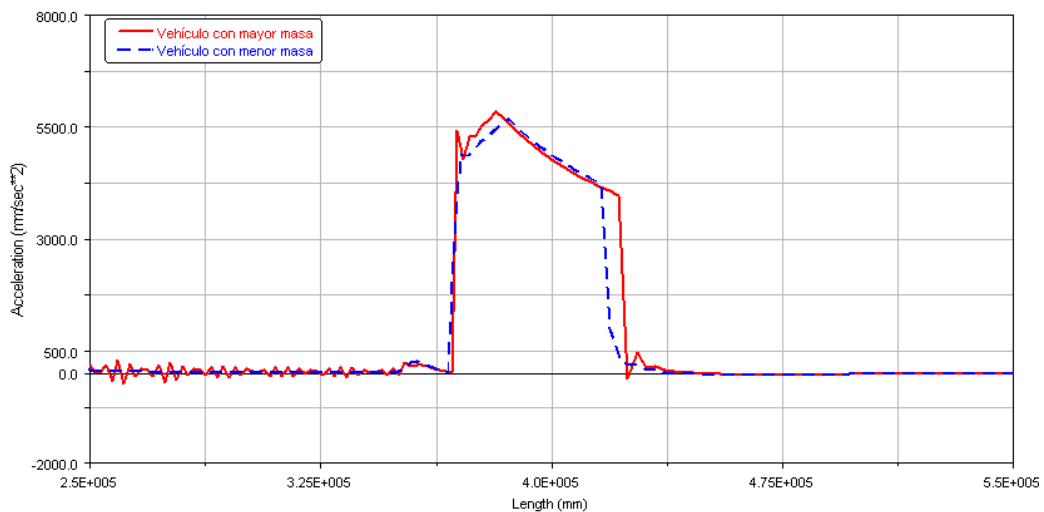


Figura 27. Detalle aceleración longitudinal circuito cerrado en buenas condiciones

En la figura 28 se observa la aceleración lateral de ambas variantes a lo largo del circuito. Esta aceleración únicamente es distinta de cero en el paso por curva, siendo mayor la del vehículo más ligero ya que realiza las curvas a una velocidad superior.

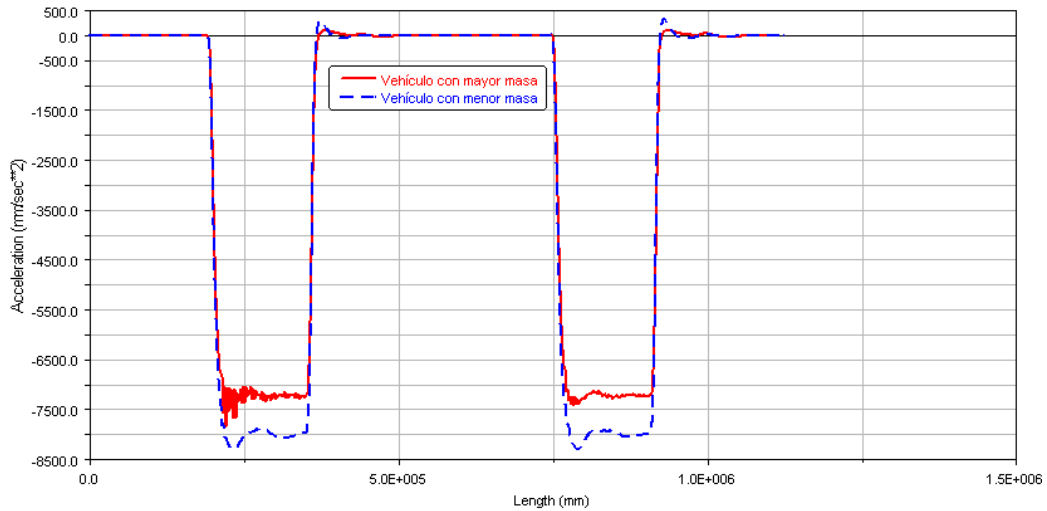


Figura 28. Comparación aceleración lateral circuito cerrado en buenas condiciones

En la figura 29 se muestra la evolución de la velocidad de las dos variantes del vehículo al recorrer el circuito en condiciones desfavorables de adherencia.

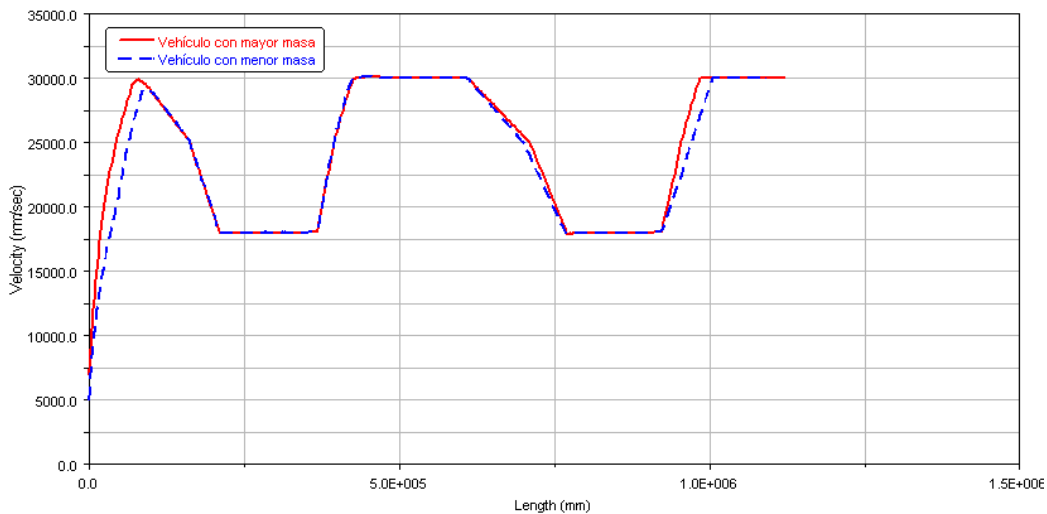


Figura 29. Comparación velocidades circuito cerrado en condiciones desfavorables

Se observa que, aunque ambos modelos recorren los tramos rectos y curvos a la misma velocidad, al modelo más ligero le cuesta un poco más acelerar hasta alcanzar la velocidad de las rectas. Esto es debido a la dificultad que tiene al acelerar cuando baja la adherencia, como se comprobó anteriormente en los ensayos de aceleración.

Esto se comprueba en la figura 30, donde se representa la aceleración longitudinal para los dos modelos.

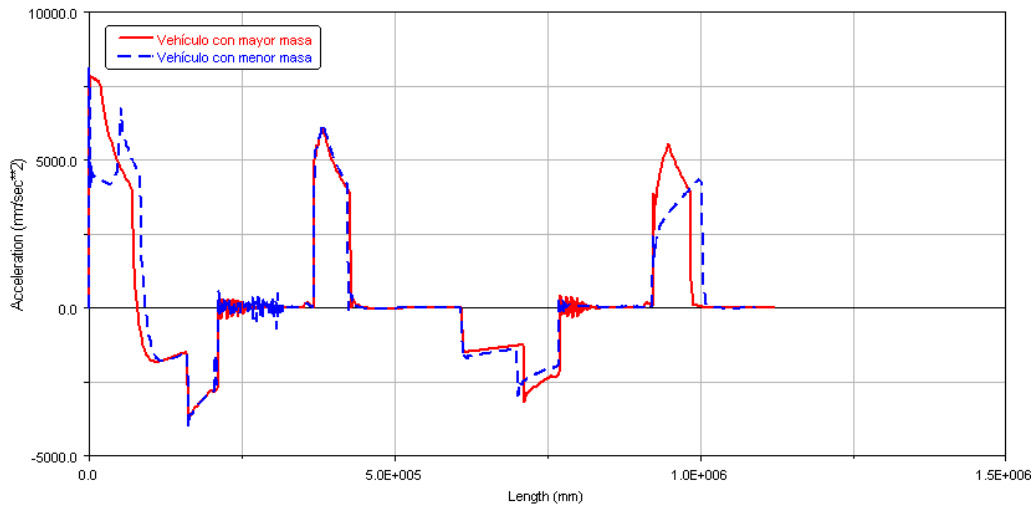


Figura 30. Comparación aceleración longitudinal circuito cerrado en condiciones desfavorables

Se observa que, para el vehículo con menor masa, hay más variaciones de la aceleración en los tramos rectos, puesto que le cuesta más mantener la velocidad constante. También se observa que le cuesta más alcanzar el pico de aceleración, sobre todo en los primeros instantes de la simulación, debido a que al disminuir la adherencia empeora la tracción del vehículo, como se comprobó en el ensayo de aceleración.

En la figura 31 se muestra la aceleración lateral de ambas variantes, donde se observa que son muy similares, ya que recorren las curvas a la misma velocidad.

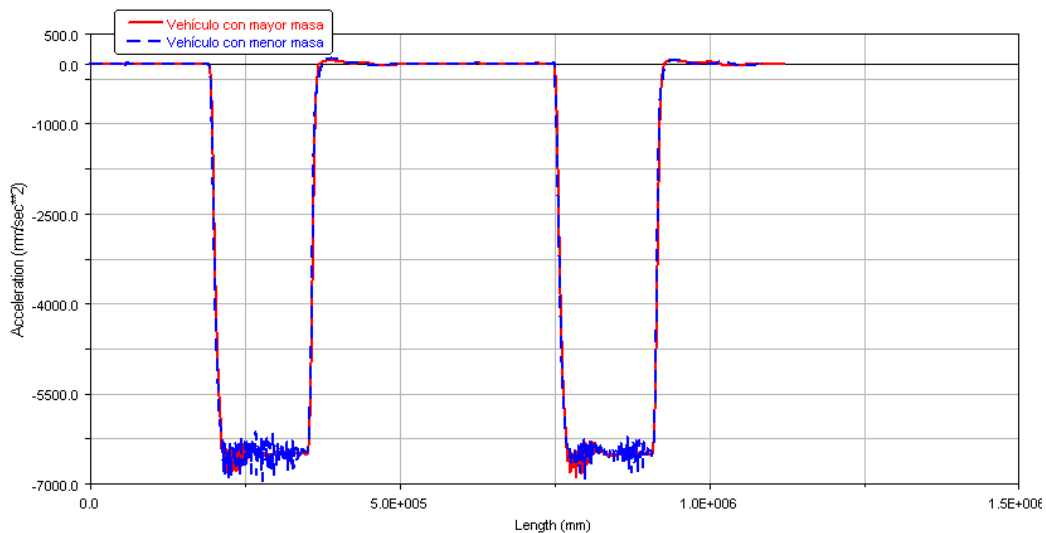


Figura 31. Comparación aceleración lateral circuito cerrado en condiciones desfavorables

2.3.5 Validación de resultados

Una vez obtenidos todos los resultados se deberá comprobar si se corresponden con los que se obtendrían al realizar los ensayos con el vehículo real. Para ello se utilizará el programa Automóviles Eléctricos, creado por el Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza. Este programa se ha estado utilizando dentro del departamento durante años, por lo que su fiabilidad está comprobada.

Al introducir las características del vehículo, el programa muestra los resultados obtenidos teóricamente.

Para el modelo inicial del vehículo se obtienen los siguientes resultados:

- En buenas condiciones:
 - Aceleración máxima: $8,69 \text{ m/s}^2$.
 - Velocidad máxima al realizar una curva de 50 metros de radio: $21,02 \text{ m/s}$ ($75,672 \text{ km/h}$).
- En condiciones desfavorables:
 - Aceleración máxima: $7,21 \text{ m/s}^2$.
 - Velocidad máxima al realizar una curva de 50 metros de radio: $19,18 \text{ m/s}$ ($69,048 \text{ km/h}$).

Para la variante del vehículo con mayor masa los resultados son los siguientes:

- En buenas condiciones:
 - Aceleración máxima: $8,69 \text{ m/s}^2$.
 - Velocidad máxima al realizar una curva de 50 metros de radio: $21,02 \text{ m/s}$ ($75,672 \text{ km/h}$).
- En condiciones desfavorables:
 - Aceleración máxima: $7,21 \text{ m/s}^2$.
 - Velocidad máxima al realizar una curva de 50 metros de radio: $19,18 \text{ m/s}$ ($69,048 \text{ km/h}$).

Para el modelo más ligero del vehículo, al comparar los resultados obtenidos con el programa ADAMS/Car con los obtenidos con el programa Automóviles Eléctricos se puede comprobar que son prácticamente iguales. El error que se aprecia en la aceleración máxima en condiciones desfavorables es debido a las diferentes formas de cálculo de cada programa, mientras que el programa Automóviles Eléctricos realiza el cálculo una sola vez para la situación inicial, ADAMS/Car utiliza un método iterativo, realizando varios cálculos para cada punto, de forma que resulta más exacto. La diferencia que se aprecia entre los demás resultados de este modelo es debida también a la diferente forma de cálculo de cada programa.

Lo mismo ocurre a la hora de calcular las prestaciones del vehículo más pesado, el programa Automóviles Eléctricos calcula la capacidad de aceleración y la velocidad máxima a la que el vehículo podría realizar la curva en la situación inicial. En este punto la masa no influye en el cálculo de esta capacidad por lo que no se observa variación en los resultados obtenidos. Por otra parte, en los resultados obtenidos con ADAMS/Car, al realizar los cálculos para cada punto a lo largo de todo el trayecto, se puede observar que la masa realmente influye en las prestaciones del vehículo.

Finalmente, después de analizar todos los resultados obtenidos, se puede concluir que el modelo del vehículo es una buena aproximación al prototipo real.

3 Simulación en recorrido real

Una vez realizados los ensayos previos y analizado el comportamiento del vehículo, se procederá a la simulación del mismo en un circuito real. De esta forma se podrá analizar el comportamiento del modelo a lo largo de un recorrido que podrá realizar también el vehículo real, pudiéndose comparar los resultados obtenidos en ambos casos.

3.1 Elección del recorrido

A la hora de diseñar el circuito sobre el que se va a realizar el análisis del modelo se han tenido en cuenta diversos factores.

El circuito debía localizarse en las proximidades de la EINA, ya que es donde está emplazado el prototipo real. No conviene realizar los ensayos en lugares alejados, ya que tanto el tiempo como la energía invertidos en llevar el vehículo hasta el lugar de ensayo serían excesivos.

Por otra parte, debía tratarse de un recorrido urbano, ya que se ha supuesto que el vehículo se utilizará más en trayectos dentro de la ciudad. Esta suposición se basa en el hecho de que dentro de la ciudad, las ventajas del vehículo eléctrico sobre el convencional son mayores, resultando en una conducción más eficiente y con ello un ahorro de combustible.

Teniendo en cuenta estos factores se ha diseñado el recorrido que aparece en la figura 32.

El trayecto comienza en la Calle María de Luna, a la altura del edificio Torres Quevedo de la EINA, sale del Campus Rio Ebro hasta llegar a la Calle del Poeta Luciano Gracia y continúa en dirección norte hasta alcanzar la rotonda de Juslibol. En la rotonda toma la primera salida por la ronda de Boltaña y continúa hasta la siguiente rotonda, donde realiza un cambio de sentido y vuelve hasta la rotonda de Juslibol. Una vez pasada la rotonda sigue por la Calle del Poeta Luciano Gracia hasta alcanzar el desvío que permite entrar al campus por la Calle de Miguel Luesma Castán, donde atraviesa el aparcamiento situado entre los edificios del Instituto Tecnológico de Aragón llegando finalmente al punto de partida en la Calle María de Luna. Todo esto supone una longitud total de aproximadamente 2.700 metros.



Figura 32. Diseño de recorrido real en Google Earth

Además de cumplir con los factores a tener en cuenta mencionados anteriormente, el circuito diseñado posee diversas características que resultan de gran utilidad en el análisis del comportamiento del vehículo.

La característica más importante es el desnivel existente en el circuito, 12 metros, ya que esto proporciona pendientes elevadas, para el caso de un recorrido urbano, que el vehículo deberá superar. De esta forma se podrá observar el comportamiento del vehículo en estas situaciones de mayor exigencia.

El recorrido posee distintos tipos de curvas, ya sean curvas cerradas dentro de la zona de la EINA, curvas más abiertas o rotondas en las que el vehículo deberá realizar cambios de sentido. Esto permitirá analizar el comportamiento del vehículo en distintas situaciones de paso por curva.

Además, el recorrido transcurre por calles que han sido creadas o reformadas recientemente, por lo que el pavimento está en buenas condiciones, proporcionando unas condiciones óptimas para llevar a cabo los ensayos.

3.2 Toma de datos

Para la creación del circuito es necesario conocer las coordenadas de cada punto del recorrido real. Esto se ha llevado a cabo utilizando la aplicación Google Earth, que permite la creación de rutas introduciendo los puntos por los que se desea que transcurra. Se puede introducir la cantidad de puntos que se desee. Esto permite introducir más puntos en aquellas zonas donde sea necesaria una mayor cantidad de coordenadas para definir las, tales como curvas y rotondas, que en zonas donde no se necesiten tantos puntos, como en las rectas.

La creación del circuito se ha realizado por tramos. De esta forma, si fuera necesario realizar algún cambio sobre el recorrido final, el punto que se desea modificar sería más sencillo de localizar y sólo se tendría que cambiar el tramo afectado. Además, al tener identificados los tramos rectos y curvos, resulta más fácil realizar el control de velocidad del vehículo, puesto que se conocen con exactitud los puntos en los que empieza y termina cada curva.

El circuito consta de 19 tramos, con un total de 801 puntos de coordenadas. En la figura 33 se puede ver un detalle del segundo tramo del circuito, donde se observa la posición de los puntos introducidos.



Figura 33. Detalle de tramo en Google Earth

Una vez diseñado el circuito, se deben exportar las coordenadas de cada punto para poder introducirlas en ADAMS/Car. Para ello, Google Earth permite guardar cada tramo en un archivo compatible con Excel y que contiene todas las coordenadas que lo forman.

El principal inconveniente reside en que en dicho archivo, las coordenadas que aparecen son coordenadas geográficas, es decir se expresan en longitud y latitud mediante grados, minutos y segundos. Ya que para la creación de la carretera en ADAMS/Car los datos deben ser introducidos en metros, se deberá realizar un cambio de coordenadas al sistema UTM (en inglés *Universal Transverse Mercator*). Este sistema de coordenadas se basa en la proyección cartográfica de Mercator y se expresa en metros.

A esto se le suma el hecho de que en el archivo abierto en Excel, todas las coordenadas aparecen en la misma celda. De esta forma se deberán copiar los valores de latitud y longitud de cada punto uno a uno e introducirlos en otra hoja de Excel, donde se llevará a cabo el cambio de coordenadas.

El valor de la altura en cada punto no aparece en el archivo guardado. Sin embargo, Google Earth permite mostrar el perfil de elevación de cada tramo creado. Para obtener los valores de la altura absoluta a lo largo de cada tramo bastará con seguir el perfil de elevación tomando nota de los datos necesarios. En la figura 34 se puede observar un detalle del perfil de elevación del tramo 8.

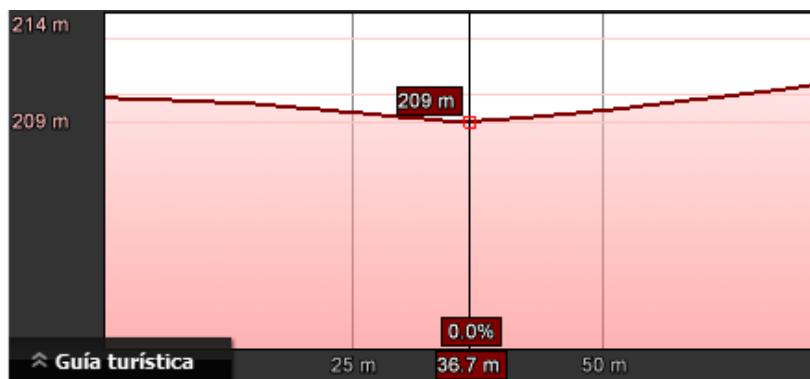


Figura 34. Detalle de perfil de elevación en Google Earth

Una vez obtenidos los valores absolutos de las coordenadas UTM y la altura de cada punto, se elegirá como origen de coordenadas al punto de partida del circuito, situado en la Calle María de Luna a la altura del edificio Torres Quevedo. De esta forma se obtendrá una altura máxima relativa de 11 metros en la zona correspondiente a la rotonda donde el vehículo realiza el cambio de sentido y una altura mínima de -1 metro en las calles del Poeta Luciano Gracia y de Miguel Luesma Castán.

3.3 Creación del circuito 3D en ADAMS/Car

Teniendo los valores relativos de las coordenadas y la altura de cada punto se procederá a la creación del circuito en ADAMS/Car con la herramienta Road Builder.

A diferencia de las carreteras creadas en los ensayos anteriores, este circuito tendrá una anchura de 3,5 metros. Esto se debe al hecho de que, al ser un circuito urbano, la simulación se ha pensado de forma que el vehículo circule por un solo carril. Además, ningún tramo del circuito tendrá peralte.

El circuito obtenido se muestra en la figura 35.

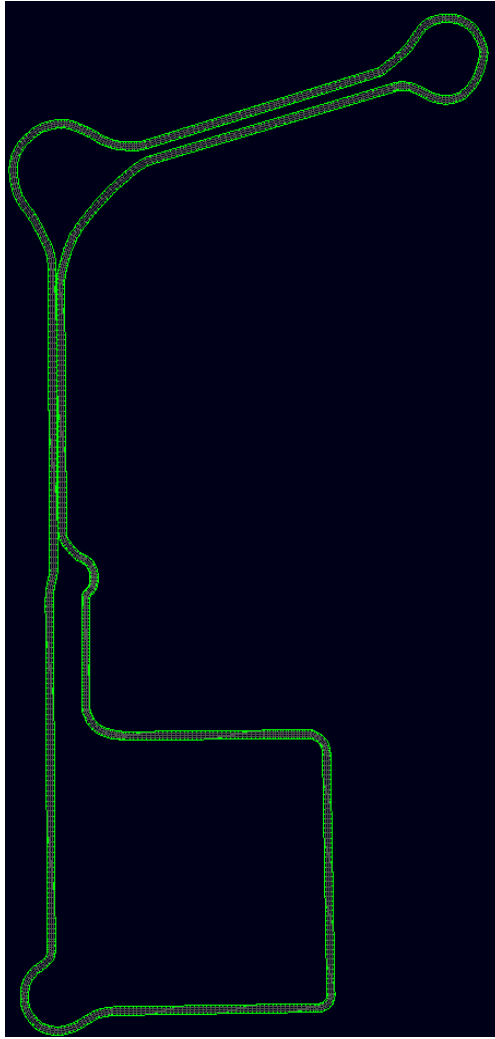


Figura 35. Circuito real creado en ADAMS/Car

En la figura 36 se observa el desnivel existente en el circuito, exactamente en la zona de la rotonda de Juslibol.

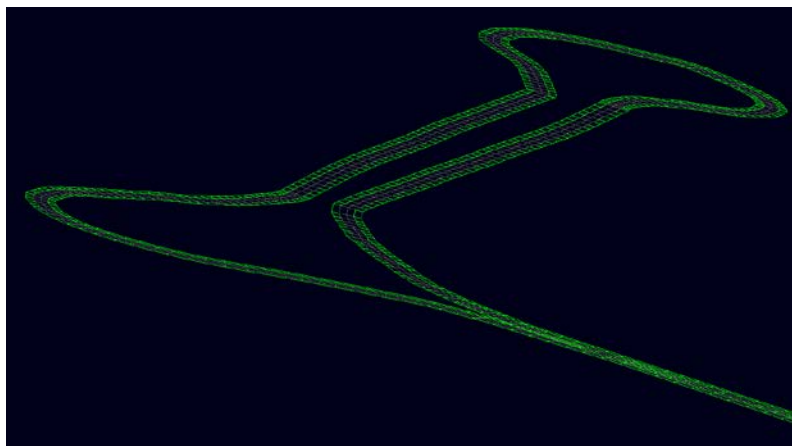


Figura 36. Detalle del desnivel en ADAMS/Car

4 Análisis y Resultados

En el recorrido real se llevarán a cabo simulaciones en buenas condiciones de adherencia sobre las dos variantes del vehículo, utilizando el mismo tipo de análisis que en los ensayos previos, 3D Road. De esta forma se analizará la influencia de la masa en las prestaciones del vehículo, así como en la energía consumida al realizar una vuelta completa al circuito.

Para el control del vehículo a lo largo del circuito se utilizará el archivo circuito.dcd. La máxima velocidad que se alcanzará será de 13,89 m/s (50 km/h) en las zonas de la Calle del Poeta Luciano Gracia y la Ronda de Boltaña. La velocidad mínima será de 5,56 m/s (20 km/h) en la Calle de Miguel Luesma Castán y la zona del aparcamiento del campus.

En la figura 37 se muestra la altura del vehículo en función de la distancia recorrida. En ella se observa el desnivel existente a lo largo de todo el circuito, el cual tiene una altura relativa máxima de 11 metros y una mínima de -1 metro. También se pueden observar las pendientes, elevadas para ser el caso de un trayecto urbano, que el vehículo ha sido capaz de superar.

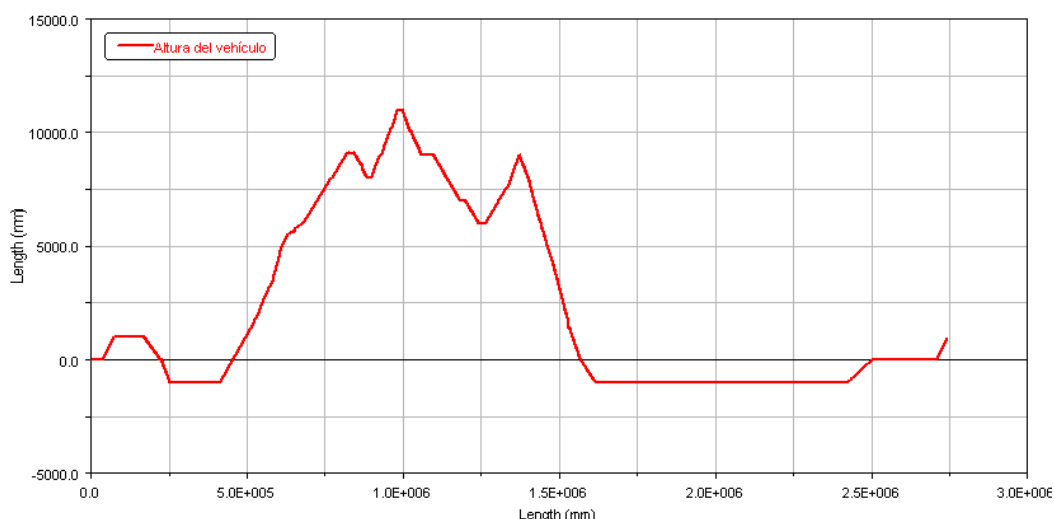


Figura 37. Altura del vehículo a lo largo del circuito

En la figura 38 se observa la evolución de la velocidad de ambos modelos a lo largo de todo el recorrido, donde se puede observar que hay diferencias para cada variante.

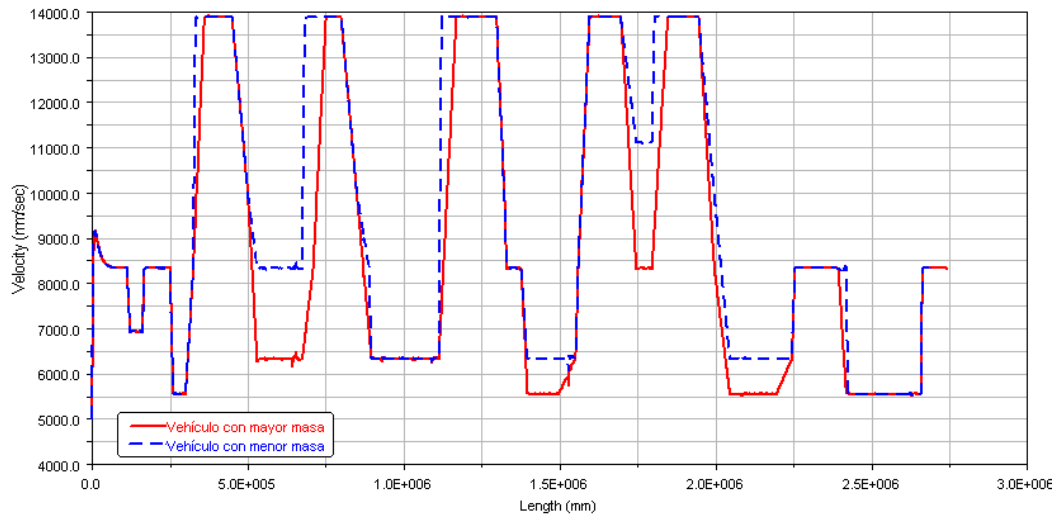


Figura 38. Comparación velocidades circuito

Para la variante del vehículo con mayor masa se observa que realiza algunos tramos del circuito a una velocidad menor que el modelo más ligero. Estos tramos se corresponden con curvas del circuito que el modelo más pesado no puede realizar a una velocidad tan alta como la variante de menor peso.

Esto se debe a que, al tener una mayor masa, el valor de la fuerza centrífuga que sufre esta variante es mayor, como se comprobó en los ensayos previos, por lo que tiene que disminuir más la velocidad al atravesar esas curvas.

Por otra parte, se observa que en algunas situaciones en las que el modelo más ligero aumenta rápidamente la velocidad, la variante con mayor masa tarda más en alcanzar esa velocidad, siendo más evidente a la salida de las curvas que el modelo pesado tiene que realizar de forma más lenta.

Esto es debido a que el aumento de la masa del vehículo afecta de forma negativa a la aceleración máxima del vehículo, como se pudo comprobar en el ensayo de aceleración, por lo que el modelo más pesado, al tener una aceleración máxima menor, recorre más distancia hasta alcanzar la velocidad máxima.

La figura 39 muestra la evolución de la aceleración longitudinal de cada variante a lo largo del circuito.

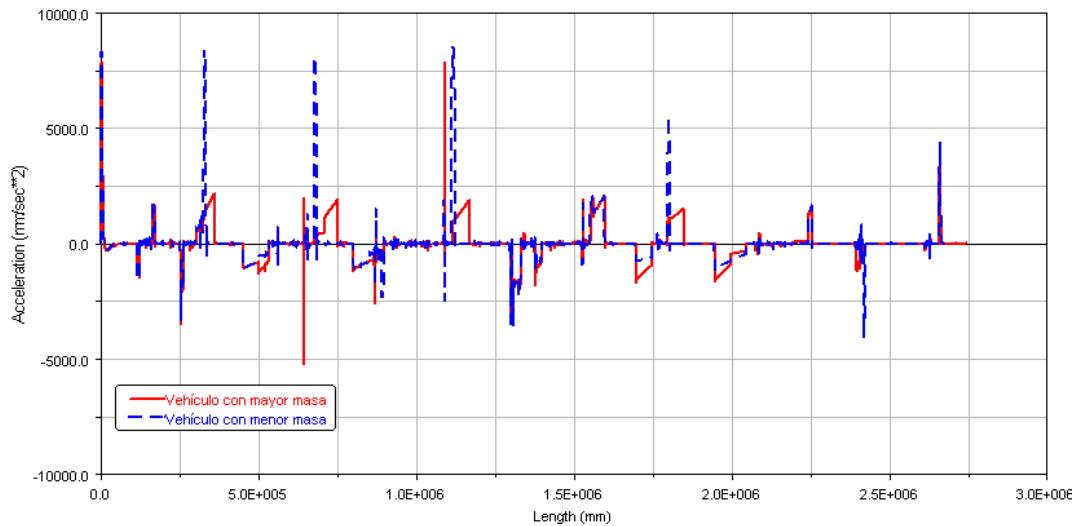


Figura 39. Comparación aceleración longitudinal en circuito

En esta figura se pueden observar las diferencias mencionadas anteriormente. Se comprueba que los picos de aceleración máxima del vehículo con mayor masa son menores que los del modelo más ligero. También se observa que en las curvas en las que la variante más pesada tiene que disminuir más la velocidad, los picos de aceleración negativa son mayores que los del vehículo con menor masa.

Además, se observa que cuando ambos vehículos tienen que aumentar la velocidad, los picos de aceleración del modelo con mayor masa son más anchos, por lo que recorre una mayor distancia acelerando. Esto coincide con lo visto anteriormente, cuando el vehículo más pesado tardaba más en alcanzar la velocidad máxima.

En la figura 40 se muestra la aceleración lateral de ambos modelos a lo largo de todo el recorrido.

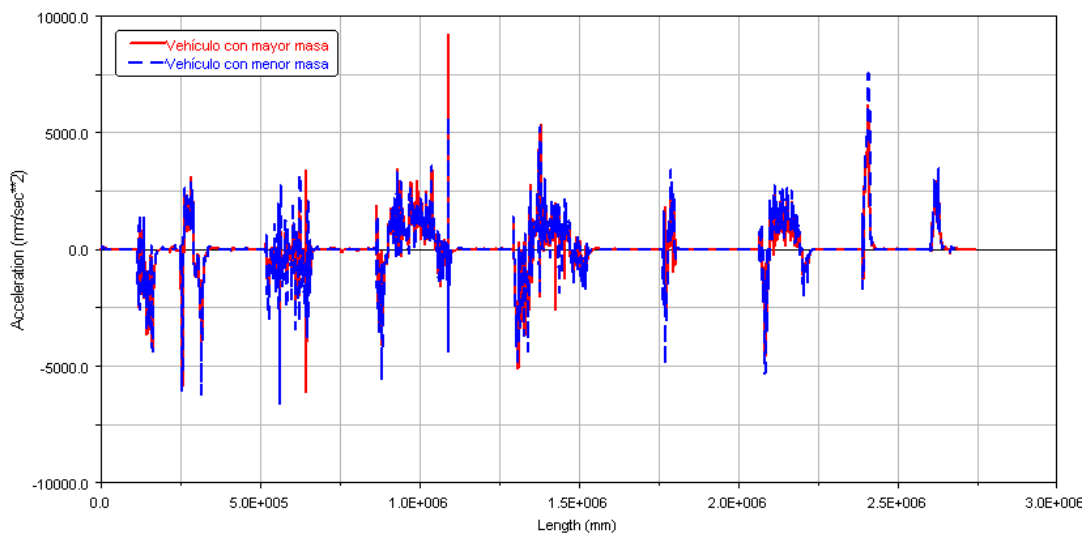


Figura 40. Comparación aceleración lateral en circuito

Se puede observar que es muy similar para ambos modelos, las pequeñas diferencias que se aprecian en algunos picos son debidas a que, en algunas curvas, la variante del vehículo más pesado reduce más la velocidad que la variante más ligera.

4.1 Análisis del consumo de energía

Una vez analizadas las diferencias entre la velocidad y ambas aceleraciones de los dos modelos en el circuito, se procederá a comparar el consumo de energía de cada variante. Se empezará comparando la fuerza que realiza cada vehículo a lo largo de todo el recorrido. Esto se muestra en las figuras 41 y 42.

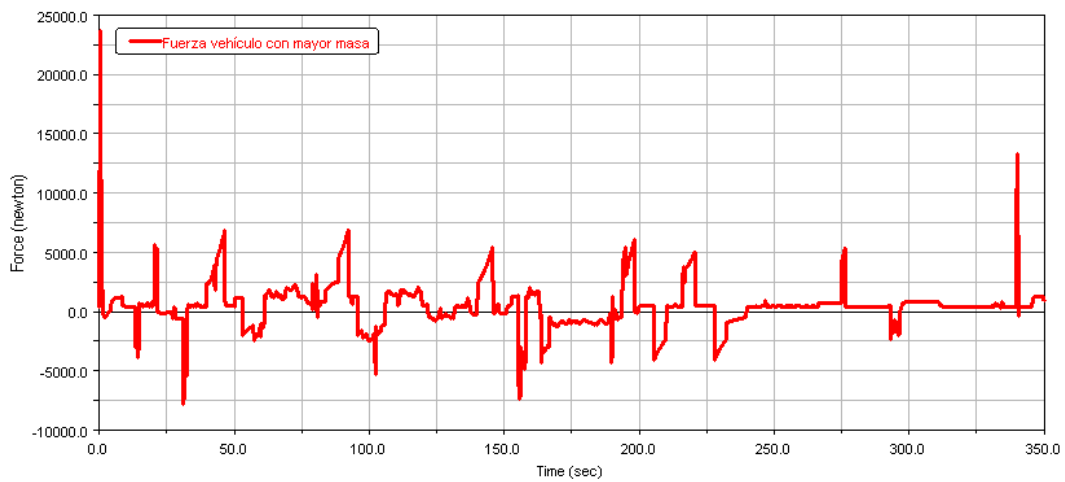


Figura 41. Fuerza vehículo con mayor masa

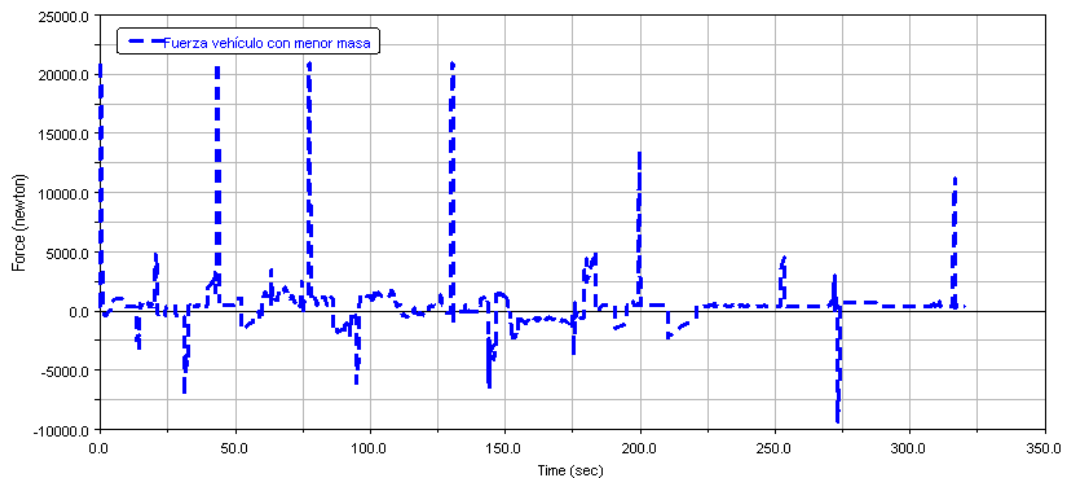


Figura 42. Fuerza vehículo con menor masa

La principal diferencia que se puede observar es la aparición de unos picos de fuerza para la variante más ligera. Esto se debe a las diferencias en la aceleración longitudinal de cada modelo, ya que, como se comprobó anteriormente, el vehículo con menor masa alcanzaba picos de aceleración más altos, mientras que el modelo más pesado realizaba aceleraciones menores durante más tiempo. De esta forma, al ser mayor la aceleración del vehículo más ligero, también lo es la fuerza que debe ejercer para realizar esa aceleración.

Las figuras 43 y 44 muestran la energía que necesitan la variante con mayor y menor masa respectivamente para dar una vuelta completa al circuito.

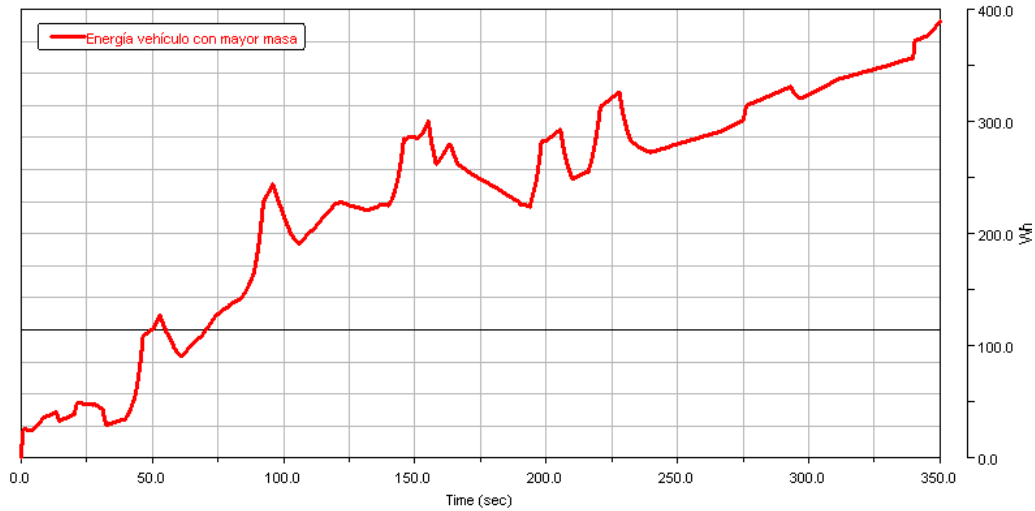


Figura 43. Energía vehículo con mayor masa

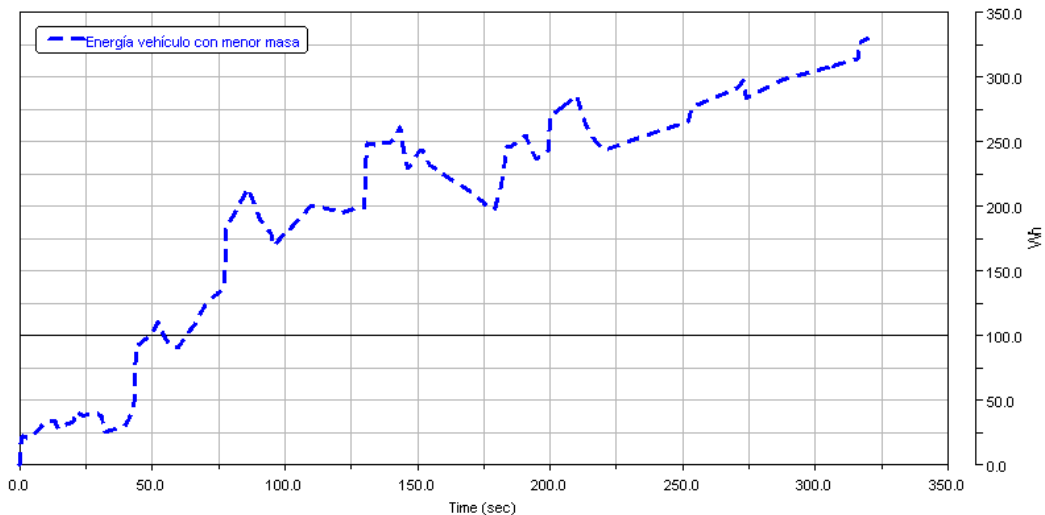


Figura 44. Energía vehículo con menor masa

Se puede comprobar que es mayor la energía consumida por el vehículo con mayor masa, aproximadamente 390 Wh, mientras que el vehículo con menor masa necesita alrededor de 325 Wh para completar el recorrido.

Sabiendo que la longitud total del circuito es de 2.700 metros y que la densidad energética de las baterías es de 90 Wh/kg, se puede realizar un cálculo aproximado de la distancia que sería capaz de recorrer cada variante del modelo. Esto se muestra en la tabla 1.

Variante	$E_{\text{consumida}}$ (Wh)	Consumo medio (Wh/km)	$M_{\text{baterías}}$ (kg)	$E_{\text{baterías}}$ (Wh)	Distancia (km)
Ligera	325	120,37	672	60.480	502,45
Pesada	390	144,44	972	87.480	605,65

Tabla 1. Autonomía estimada de cada variante

Se puede comprobar que un aumento de la masa del vehículo provoca también un aumento en la energía consumida por dicho vehículo. Sin embargo, al tener mayor cantidad de baterías, el vehículo más pesado podría recorrer una distancia mayor antes de que se agotaran sus baterías.

Como conclusión final a los ensayos realizados se comprueba que un aumento de 300 kg en la masa del vehículo, lo que supone un aumento del 11% aproximadamente, provoca un descenso de un 6% en la aceleración máxima del vehículo y de un 5% en la velocidad de paso por curva. Sin embargo, si este incremento de masa se debe a un aumento en el número de baterías, esto provoca un aumento de un 17% en la autonomía del vehículo.

5. Conclusiones

5.1 Resumen y cumplimiento de objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado consistía en la caracterización del comportamiento de un vehículo eléctrico de altas prestaciones mediante una herramienta de simulación, el software ADAMS/Car. Para cumplir este objetivo se marcaron una serie de sub-objetivos.

Se empezó con una fase de documentación sobre vehículos eléctricos, para conocer sus principales características y comprender su comportamiento. Posteriormente se estudió la situación inicial del modelo, con el fin de conocer con exactitud las propiedades de los sistemas que lo forman.

Una vez conocido el estado inicial del modelo se llevó a cabo una etapa de aprendizaje de la utilización del programa ADAMS/Car. Se estudiaron principalmente los diferentes tipos de análisis que ofrece el programa, pero también las posibles formas de realizar modificaciones sobre el modelo.

A continuación se realizaron una serie de ensayos previos, sobre el modelo inicial del vehículo y sobre una variante de mayor masa. Estos ensayos se llevaron a cabo en dos situaciones de pavimento con distintas condiciones de adherencia. Una vez realizadas las simulaciones se analizaron los resultados obtenidos, concluyendo que el modelo virtual del vehículo representaba fielmente al prototipo real.

El siguiente paso fue la creación en el software ADAMS/Car de un circuito que representara un recorrido urbano real. Sobre este circuito se simularon ambos modelos del vehículo y se analizaron los resultados obtenidos, comparando el comportamiento de cada variante.

De esta forma se pudo comprobar que un aumento en la masa del vehículo produce un descenso en la aceleración máxima y en la estabilidad al paso por curva del vehículo, además de provocar un aumento del consumo de energía. Sin embargo, si este incremento de masa se debe a un aumento del número de baterías, el vehículo sería capaz de recorrer una mayor distancia antes de que se descarguen por completo sus baterías.

Una vez finalizado este Trabajo de Fin de Grado se puede afirmar que se han cumplido tanto los sub-objetivos marcados al inicio de la memoria como el objetivo principal del trabajo.

5.2 Posibilidades de continuación

Una vez finalizado este Trabajo de Fin de Grado se observa que hay múltiples posibilidades de continuación.

Por un lado, podrían llevarse a cabo simulaciones en diversas situaciones de conducción, creando escenarios distintos a los que se han utilizado en los ensayos de este trabajo para conocer con más exactitud el comportamiento del vehículo en un recorrido urbano. También se podrían realizar ensayos en trayectos interurbanos, de esta forma podría analizarse el comportamiento del vehículo a altas velocidades.

Por otro lado, se podrían crear un sinnúmero de variantes del vehículo modificando cualquiera de los componentes que lo forman, lo que sería de gran utilidad a la hora de estudiar la influencia que tienen cada uno de ellos sobre las prestaciones del vehículo. Además, al observar los resultados obtenidos para dichas variantes, se podría valorar la opción de modificar el vehículo real.

Otra posibilidad sería la modelización de otros vehículos, ya que al comprobar que se pueden crear modelos fiables, podría analizarse el comportamiento de otros vehículos ya existentes o de modelos que aún no se hayan fabricado. De esta forma se tendría una primera idea de cómo funciona el vehículo antes de arriesgarse a fabricar un prototipo.

5.3 Incidencias

Este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado durante aproximadamente 7 meses, de febrero a septiembre de 2015, en el grupo de investigación GITEL, situado en el edificio Betancourt de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura.

Durante los tres primeros meses se llevó a cabo una etapa de documentación sobre vehículos eléctricos y de aprendizaje en el manejo del software ADAMS/Car. También se realizó la labor del reconocimiento del estado inicial del modelo. Para todo esto fue necesaria la lectura de manuales de uso del programa y trabajos previos.

Durante los dos meses siguientes se realizaron los ensayos previos, diseñando las situaciones que se iban a simular y analizando los resultados obtenidos para cada una de ellas. También en este periodo de tiempo se llevó a cabo la elección, toma de datos y construcción del circuito real.

Finalmente, durante los dos últimos meses se llevaron a cabo las simulaciones en el circuito real, el análisis de los resultados obtenidos y la redacción de esta memoria.

6. Fuentes de información

- Trabajo de Fin de Grado: Modelización y simulación de un vehículo eléctrico de altas prestaciones. Autor: Javier Ramón Miranda. Director: Emilio Larrodé Pellicer. Realizado en Zaragoza en Septiembre de 2014.
- Proyecto de Fin de Carrera de Ingeniería Industrial: Simulación de vehículo eléctrico para la optimización de su comportamiento. Autor: Juan Alberto Liarte Marín. Director y ponente: Emilio Larrodé Pellicer. Realizado en Zaragoza en Marzo de 2010.
- MSC Software 2008. Adams/Car Online Help
- MSC Software 2008. Adams/PostProcessor Online Help

ANEXOS

Anexo I: Road Builder

Para realizar una simulación en el programa ADAMS/Car se necesita una carretera sobre la que llevarla a cabo. Para todos los tipos de análisis, ADAMS/Car posee archivos de carreteras en una biblioteca, ya sean tramos aislados o circuitos enteros. Sin embargo, para la realización de este Trabajo de Fin de Grado se ha optado por crear un archivo de carretera para cada análisis que se ha llevado a cabo.

Para la creación de carreteras 3D se utiliza la herramienta Road Builder, disponible en el modo de trabajo Standard Interface. En la figura 45 se muestra la ventana que aparece al iniciar esta herramienta. Lo primero que se deberá hacer será crear un nuevo archivo de carretera o bien abrir un archivo ya existente que se desee modificar. La primera pestaña que aparece es Header, donde se indican las características del archivo. En esta pestaña se deberán introducir las unidades que se vayan a utilizar para las magnitudes que se indican.

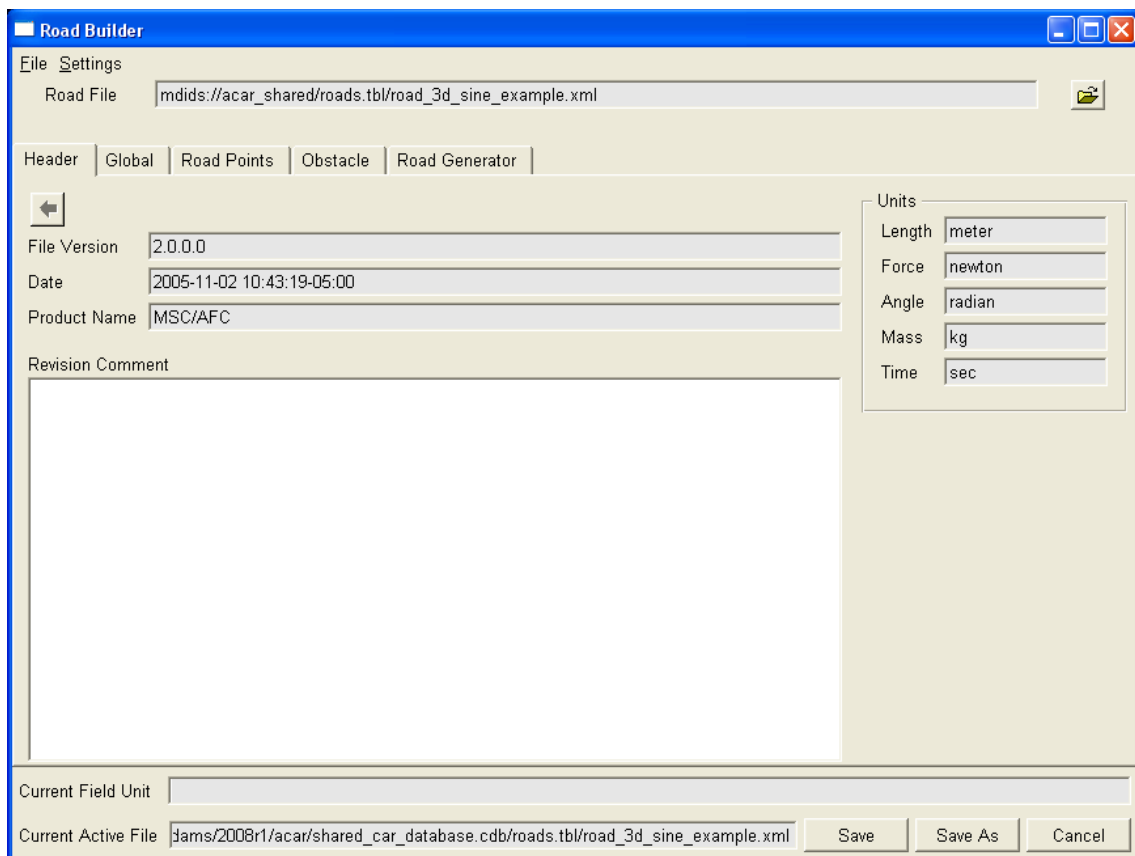


Figura 45. Pestaña Header de Road Builder

En la pestaña Global, mostrada en la figura 46, se deben indicar las propiedades generales de la carretera que se va a crear. Se deberá indicar el sentido en el que el vehículo recorrerá la carretera y si se va a tratar de un circuito cerrado o abierto. También se deberán indicar los valores de la anchura de la carretera, ángulo de peralte si lo tuviera y el coeficiente de fricción de la parte izquierda y la derecha de la carretera.

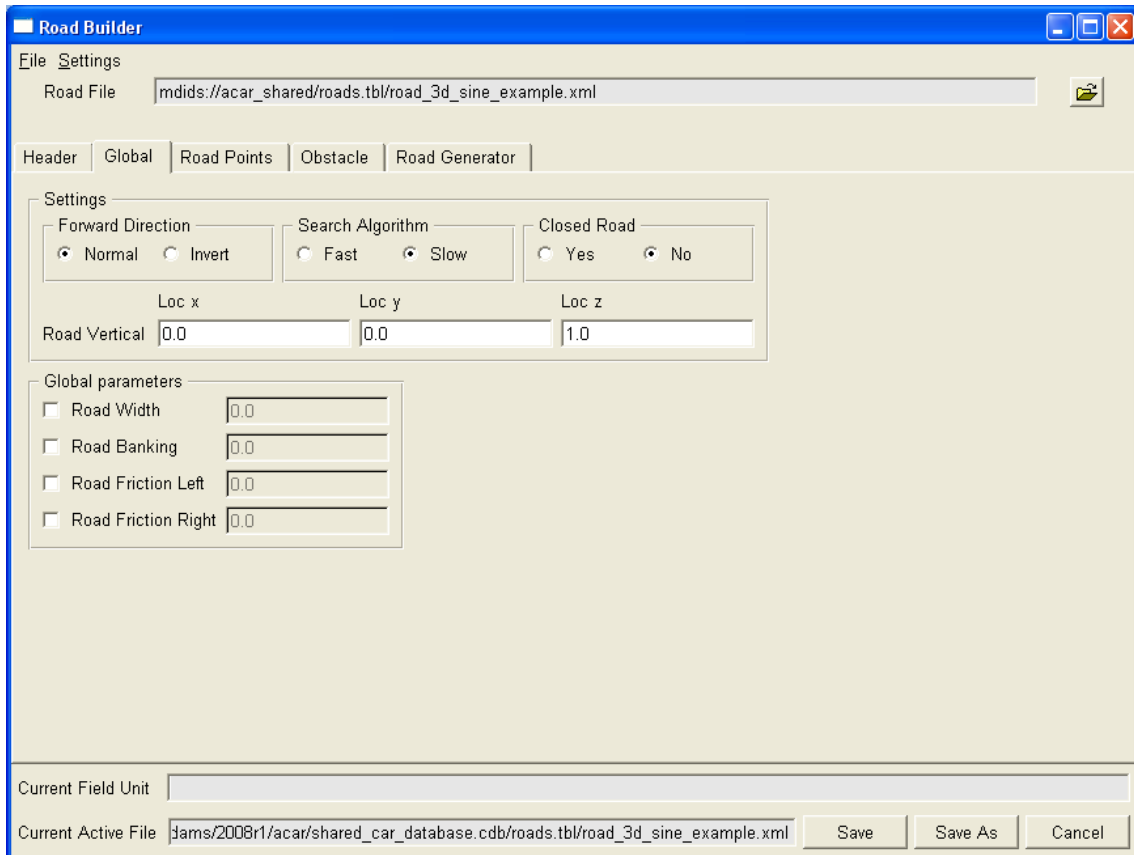


Figura 46. Pestaña Global de Road Builder

La siguiente pestaña es Road Points, donde se muestran todos los puntos que forman la carretera creada. Para crear una carretera desde esta pestaña basta con pinchar en el botón Add Road Points e indicar la cantidad de puntos que se desea añadir. De esta forma se creará una tabla con una fila para cada punto de la carretera, para el que se deberán indicar sus coordenadas (X,Y,Z), la anchura, el ángulo de peralte y los coeficientes de fricción de ambos lados de la carretera en dicho punto. Esto se observa en la figura 47.

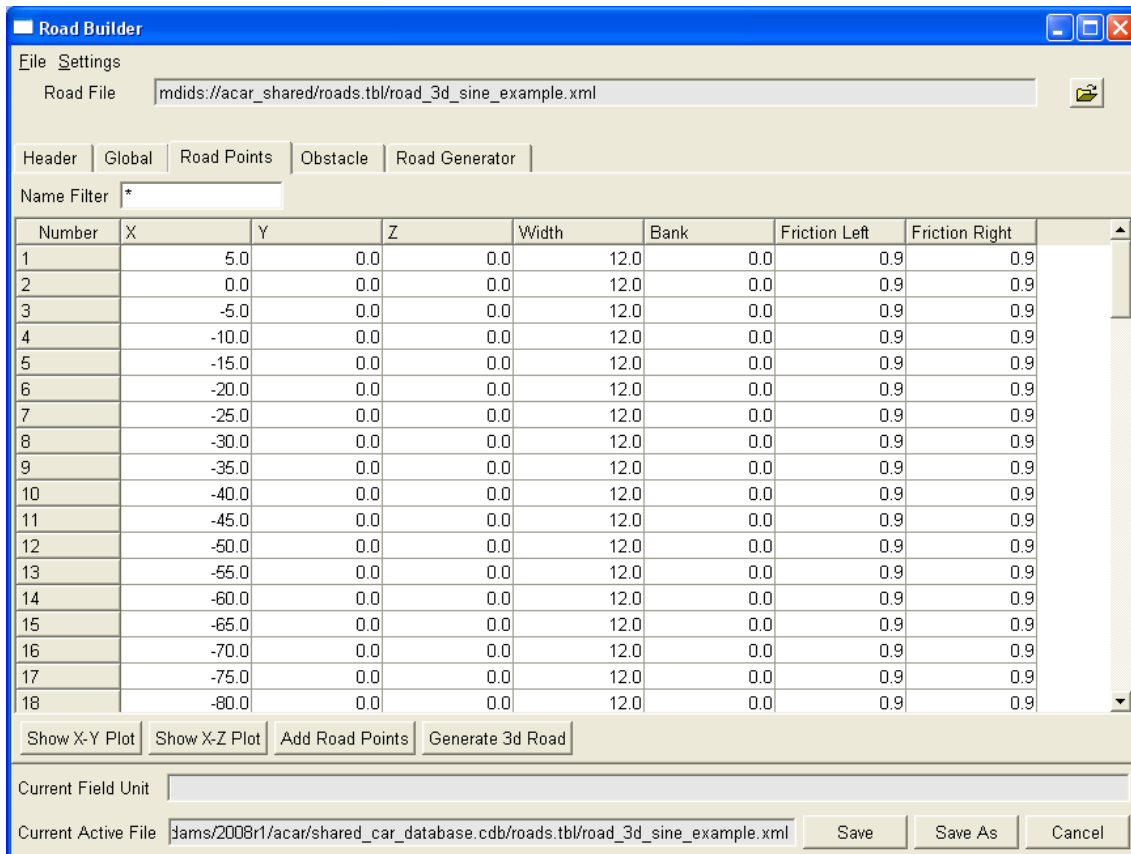


Figura 47. Pestaña Road Points de Road Builder

Esta pestaña también permite mostrar gráficos X-Y o X-Z de los puntos introducidos así como generar una vista 3D de la carretera creada, pudiendo comprobar en cada momento la forma de dicha carretera.

La pestaña Obstacle se utiliza para diseñar obstáculos que aparecen en la carretera. Como se observa en la figura 48, simplemente hay que seleccionar el tipo de obstáculo que se desea introducir y sus características. Además se deberán introducir las coordenadas del principio y final del obstáculo.

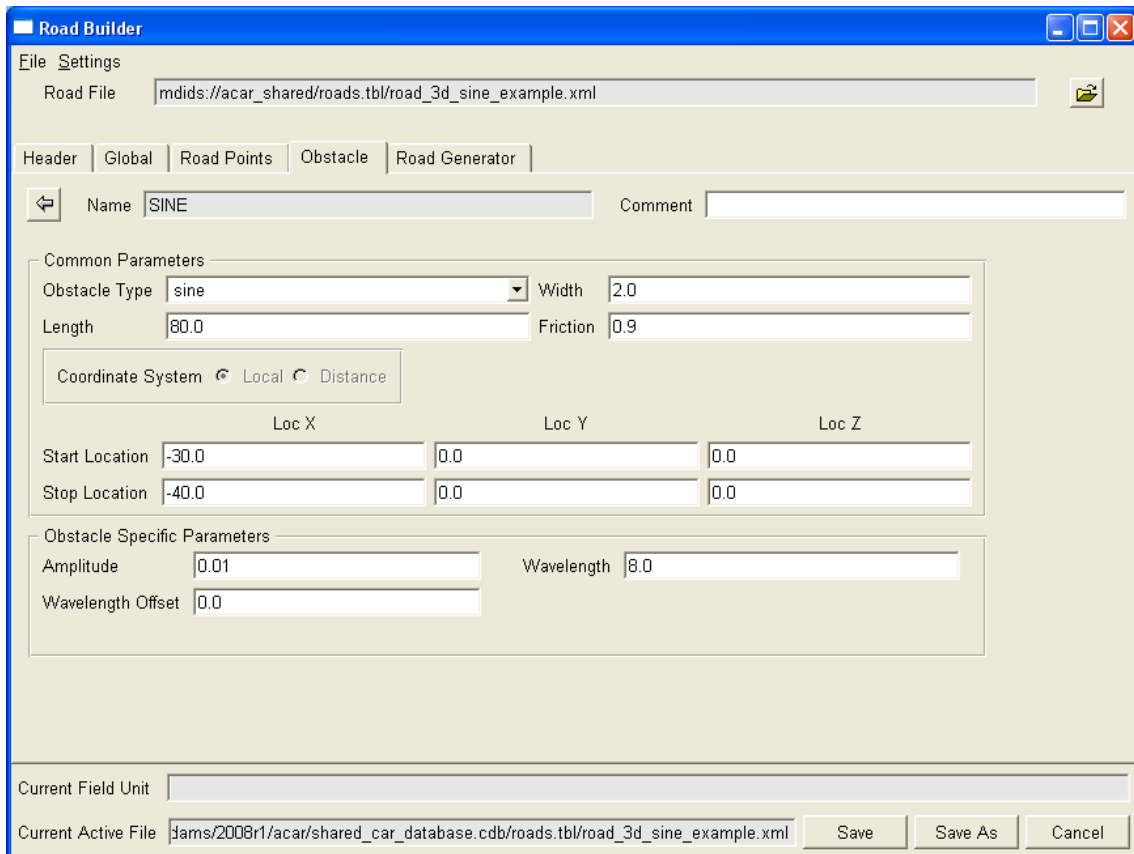


Figura 48. Pestaña Obstacle de Road Builder

La última pestaña es Road Generator, mostrada en la figura 49. Desde aquí se podrán crear tramos enteros de una carretera, ya sean rectos o curvos. Únicamente habrá que poner un nombre al tramo y pinchar el botón Add para que se añada una fila a la tabla superior. Cada fila corresponde a un tramo distinto y para definirlo será necesario introducir una serie de parámetros tales como anchura, ángulo de peralte y coeficientes de fricción. También se deberán introducir las coordenadas de los puntos donde empieza y termina el tramo, así como la cantidad de puntos que lo forman. Además para los tramos curvos se indicarán el radio de curvatura y la longitud del arco que forman.

Una vez definidos los tramos que forman la carretera, se deberán exportar a la tabla de datos pinchando el botón Export Points to Data Table. De esta forma se creará una tabla en la pestaña Road Points con todos los puntos necesarios para crear los tramos indicados.

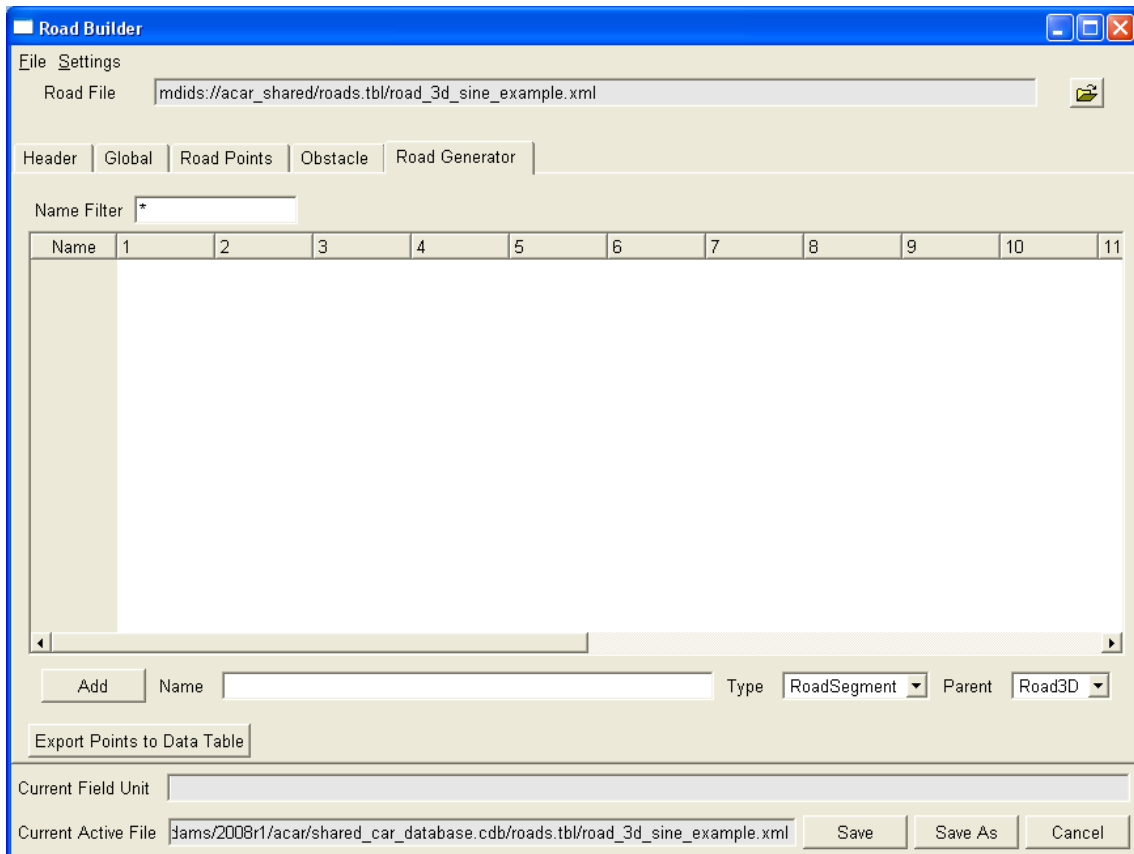


Figura 49. Pestaña Road Generator de Road Builder

Para la construcción de las carreteras utilizadas en los análisis realizados se han utilizado tanto la pestaña Road Generator como la Road Points. En la construcción del tramo recto se ha utilizado la pestaña Road Generator, mientras que las demás carreteras se han construido introduciendo los puntos directamente en la pestaña Road Points.

A la hora de definir los puntos se pueden copiar directamente desde un archivo de Excel, por lo que al tener todas las coordenadas del circuito final en una hoja Excel, resulta más rápido copiarlas directamente a la pestaña Road Points que crear todos los tramos uno a uno en la pestaña Road Generator.

Anexo II: Archivos DCD

Para realizar el tipo de análisis 3D Road se necesita controlar el vehículo a lo largo de todo el recorrido. ADAMS/Car ofrece dos opciones a la hora de realizar dicho control: aplicando una aceleración longitudinal constante a partir de un instante de tiempo determinado o mediante un archivo DCD (Driver Control Data).

En este Trabajo de Fin de Grado se han utilizado archivos DCD para controlar todas las simulaciones realizadas. Estos archivos contienen la información necesaria para controlar el vehículo durante la simulación y, aunque los datos que se deben introducir varían en función del tipo de control que se desee aplicar sobre el vehículo, su estructura se mantiene constante para todos ellos.

La primera parte del archivo hace referencia a las características del archivo, donde se deberá indicar su nombre, tipo, versión y formato. También se puede añadir un pequeño comentario acerca del contenido del archivo. La figura 50 muestra esta parte del archivo.

```
$-----MDI_HEADER
[MDI_HEADER]
FILE_NAME      = iso_lane_change.dcd
FILE_TYPE      = 'dcd'
FILE_VERSION   = 1.0
FILE_FORMAT    = 'ASCII'
(COMMENTS)
{comment_string}
'Example DCD file of ISO-Lane Change Path'
```

Figura 50. Características archivo DCD

Lo siguiente que se deberá introducir son las unidades en las que se van a medir las distintas magnitudes a controlar. Esto se observa en la figura 51.

```
$-----UNITS
[UNITS]
LENGTH = 'meters'
FORCE  = 'newton'
ANGLE  = 'radians'
MASS   = 'kg'
TIME   = 'sec'
```

Figura 51. Unidades archivo DCD

Después se deberá indicar el tipo de control que se desea aplicar para la velocidad y la dirección. Del tipo de control elegido dependerán los datos que posteriormente se introducirán en el archivo, pudiendo controlar distintas variables como la posición, velocidad o aceleración. La tabla 2 muestra las opciones que ofrece ADAMS/Car a la hora de seleccionar el tipo de control.

SPEED_CONTROL STEERING_CONTROL	none	lon_vel (p1=0)	lon_acc (p1=1)	lat_acc (p1=2)	path (p1=3)
none	NOT VALID	{(distance or time), lon_vel}	{(distance or time), lon_acc}	NOT VALID	NOT VALID
curvature (p1 = 0)	{distance, curvature}	{(distance or time), curvature, lon_vel}	{(distance or time), curvature, lon_acc}	{(distance or time), curvature, lat_acc}	NOT VALID
path (p1 = 1)	{x, y}	{x, y, lon_vel}	{x, y, lon_acc}	{x, y, lat_acc}	{x, y, time}
lat_acc (p1 = 2)	NOT VALID	{distance or time, lat_acc, lon_vel}	{distance or time, lat_acc, lon_acc}	NOT VALID	NOT VALID

Tabla 2. Tipos de control de velocidad y dirección

Una vez seleccionado el tipo de control que se desea aplicar, se deberán introducir los datos que definen el control del vehículo. Estos datos se introducirán de acuerdo a las unidades definidas anteriormente para cada magnitud. La figura 52 muestra un ejemplo, donde se controla la posición del vehículo pero no hay control sobre la velocidad.

```

$-----CLOSED_LOOP
[CLOSED_LOOP]
STEERING_CONTROL = 'path'
SPEED_CONTROL = 'none'

(DATA)
{ X   Y }
  0.0 0.000
 45.0 0.000
 52.5 0.000
 60.0 0.000
 90.0 3.586
102.0 3.586
115.0 3.586
140.0 0.172
147.0 0.172
155.0 0.172
162.0 0.172
170.0 0.172
200.0 0.172
300.0 0.172
400.0 0.172
500.0 0.172

```

Figura 52. Datos archivo DCD sin control de velocidad

Si el archivo realiza control sobre la velocidad se deberán indicar unos valores que limiten la velocidad, aceleración longitudinal y aceleración lateral. Además, si el tipo de control permite elegir entre realizar el control sobre la distancia o sobre el tiempo, se deberá indicar cuál de los dos tipos se desea utilizar. Esto se muestra en la figura 53.

```

$-----CLOSED-LOOP
[CLOSED_LOOP]

comment = 'closed loop speed controller'
speed_control = 'lon_vel'
ordinal = 'time'
steering_control = 'none'

lon_vel_max = 50.0
lon_acc_max = 10.0
lon_acc_min = -10.0
lat_acc_max = 10.0
lat_acc_min = -10.0

(DATA)
{ TIME      lon_vel      }
0.00  8.3500
0.10  8.3500
0.20  8.3500
0.30  8.3500
0.40  8.3500
0.50  8.3500
0.60  8.3625
0.70  8.4000
0.80  8.4625
0.90  8.5500
1.00  8.6500
1.10  8.7500
1.20  8.8500
1.30  8.9500
1.40  9.0500
1.50  9.1500
1.60  9.2375
1.70  9.3000
1.80  9.3375
1.90  9.3500
2.00  9.3500
10.00 9.3500

```

Figura 53. Datos archivo DCD con control de velocidad

ADAMS/Car posee archivos DCD ya creados a modo de ejemplo en una biblioteca. Estos archivos son modificables con un editor de textos. De esta forma, la mejor opción para crear un archivo de control que se adapte a las necesidades del análisis que se vaya a realizar, es modificar un archivo DCD ya existente en dicha biblioteca.

II.1 Archivos DCD utilizados

Como se ha explicado en la memoria principal, se han utilizado distintos tipos de archivos DCD para controlar el vehículo en cada simulación. En el ensayo en tramo recto se ha utilizado un archivo en el que se controlaba el valor de la aceleración longitudinal a lo largo de la carretera. En todo los demás análisis se ha controlado la velocidad del vehículo en función de la distancia recorrida. En las figuras 54 a 59 se muestran los archivos DCD utilizados a lo largo de todo el Trabajo de Fin de Grado.

```
recta_acc - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
$-----MDI_HEADER
[MDI_HEADER]
FILE_NAME      = recta_acc.dcd
FILE_TYPE      = 'dcd'
FILE_VERSION   = 1.0
FILE_FORMAT    = 'ASCII'
(COMMENTS)
{comment_string}
$-----UNITS
[UNITS]
LENGTH        = 'meters'
FORCE         = 'newton'
ANGLE         = 'deg'
MASS          = 'kg'
TIME          = 'sec'
$-----OPEN-LOOP
[CLOSED_LOOP]

steering_control = 'none'
speed_control   = 'lon_acc'
ordinal         = 'distance'

lon_vel_max    = 50.0
lon_acc_max    = 10.0
lon_acc_min    = -10.0
lat_acc_max    = 10.0
lat_acc_min    = -10.0

(DATA)
{ distance, lon_acc }
0.00 10.00
10.00 10.00
20.00 10.00
100.00 10.00
120.00 10.00
150.00 10.00
200.00 10.00
250.00 10.00
300.00 10.00
350.00 10.00
400.00 10.00
450.00 10.00
500.00 10.00
550.00 10.00
600.00 10.00
650.00 10.00
700.00 10.00
750.00 10.00
800.00 10.00
```

Figura 54. Archivo recta_acc.dcd


```
curva_rapida - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
$-----MDI_HEADER
[MDI_HEADER]
FILE_NAME      = curva_rapida.dcd
FILE_TYPE      = 'dcd'
FILE_VERSION   = 1.0
FILE_FORMAT    = 'ASCII'
(COMMENTS)
{comment_string}
$-----UNITS
[UNITS]
LENGTH        = 'meters'
FORCE         = 'newton'
ANGLE         = 'deg'
MASS          = 'kg'
TIME          = 'sec'
$-----OPEN-LOOP
[CLOSED_LOOP]

steering_control = 'none'
speed_control   = 'lon_vel'
ordinal         = 'distance'

lon_vel_max    = 50.0
lon_acc_max    = 10.0
lon_acc_min    = -10.0
lat_acc_max    = 10.0
lat_acc_min    = -10.0

(DATA)
{ distance,      lon_vel      }
0.00  20.0
10.00 20.0
20.00 20.0
30.00 20.0
50.00 20.0
60.00 20.0
75.00 20.0
90.00 20.0
100.00 20.0
150.00 20.0
157.00 20.0
```

Figura 55. Archivo curva_rapida.dcd

```
curva_desfavorable - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
$-----MDI_HEADER
[MDI_HEADER]
FILE_NAME = curva_desfavorable.dcd
FILE_TYPE = 'dcd'
FILE_VERSION = 1.0
FILE_FORMAT = 'ASCII'
(COMMENTS)
{comment_string}
$-----UNITS
[UNITS]
LENGTH = 'meters'
FORCE = 'newton'
ANGLE = 'deg'
MASS = 'kg'
TIME = 'sec'
$-----OPEN-LOOP
[CLOSED_LOOP]

steering_control = 'none'
speed_control = 'lon_vel'
ordinal = 'distance'

lon_vel_max = 50.0
lon_acc_max = 10.0
lon_acc_min = -10.0
lat_acc_max = 10.0
lat_acc_min = -10.0

(DATA)
{ distance, lon_vel }
0.00 18.0
10.00 18.0
20.00 18.0
30.00 18.0
50.00 18.0
60.00 18.0
75.00 18.0
90.00 18.0
100.00 18.0
150.00 18.0
157.00 18.0
```

Figura 56. Archivo curva_desfavorable.dcd

```
circuito_cerrado - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
$-----MDI_HEADER
[MDI_HEADER]
FILE_NAME      = circuito cerrado.dcd
FILE_TYPE      = 'dcd'
FILE_VERSION   = 1.0
FILE_FORMAT    = 'ASCII'
(COMMENTS)
{comment_string}
$-----UNITS
[UNITS]
LENGTH        = 'meters'
FORCE         = 'newton'
ANGLE         = 'deg'
MASS          = 'kg'
TIME          = 'sec'
$-----OPEN-LOOP
[CLOSED_LOOP]

steering_control = 'none'
speed_control    = 'lon_vel'
ordinal          = 'distance'

lon_vel_max     = 50.0
lon_acc_max     = 10.0
lon_acc_min     = -10.0
lat_acc_max     = 10.0
lat_acc_min     = -10.0

(DATA)
{ distance, lon_vel }
0.00 20.00
50.00 30.00
90.00 30.00
100.00 30.00
150.00 30.00
200.00 30.00
257.00 30.00
350.00 25.00
400.00 20.00
520.00 20.00
558.00 20.00
600.00 30.00
700.00 30.00
800.00 30.00
900.00 25.00
958.00 20.00
1000.00 20.00
1115.00 20.00
```

Figura 57. Archivo circuito_cerrado.dcd

```
circuito_cerrado_desfavorable - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
$-----MDI_HEADER
[MDI_HEADER]
FILE_NAME      = circuito cerrado desfavorable.dcd
FILE_TYPE      = 'dcd'
FILE_VERSION   = 1.0
FILE_FORMAT    = 'ASCII'
(COMMENTS)
{comment_string}
$-----UNITS
[UNITS]
LENGTH        = 'meters'
FORCE         = 'newton'
ANGLE         = 'deg'
MASS          = 'kg'
TIME          = 'sec'
$-----OPEN-LOOP
[CLOSED_LOOP]

steering_control = 'none'
speed_control   = 'lon_vel'
ordinal         = 'distance'

lon_vel_max    = 50.0
lon_acc_max    = 10.0
lon_acc_min    = -10.0
lat_acc_max    = 10.0
lat_acc_min    = -10.0

(DATA)
{ distance, lon_vel }
0.00 18.00
50.00 30.00
90.00 30.00
100.00 30.00
150.00 30.00
170.00 30.00
200.00 30.00
257.00 30.00
350.00 25.00
400.00 18.00
520.00 18.00
558.00 18.00
600.00 30.00
700.00 30.00
800.00 30.00
900.00 25.00
958.00 18.00
1000.00 18.00
1115.00 18.00
```

Figura 58. Archivo circuito_cerrado_desfavorable.dcd

```
circuito - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
$-----MDI_HEADER
[MDI_HEADER]
FILE_NAME = circuito.dcd
FILE_TYPE = 'dcd'
FILE_VERSION = 1.0
FILE_FORMAT = 'ASCII'
$-----UNITS
[UNITS]
LENGTH = 'meters'
FORCE = 'newton'
ANGLE = 'deg'
MASS = 'kg'
TIME = 'sec'
$-----OPEN-LOOP
[CLOSED_LOOP]
steering_control = 'none'
speed_control = 'lon_vel'
ordinal = 'distance'

lon_vel_max = 50.0
lon_acc_max = 10.0
lon_acc_min = -10.0
lat_acc_max = 10.0
lat_acc_min = -10.0

(DATA)
{ distance, lon_vel }
0 8.3333333
110 8.3333333
120 6.9444444
160 6.9444444
167 8.3333333
250 8.3333333
259 5.5555556
300 5.5555556
325 8.3333333
331 13.8888889
450 13.8888889
500 10.0
530 8.3333333
675 8.3333333
681 13.8888889
800 13.8888889
850 10.0
890 8.3333333
897 6.3333333
1115 6.3333333
1122 13.8888889
1300 13.8888889
1325 10.0
1333 8.3333333
1380 8.3333333
1400 6.3333333
1555 6.3333333
1563 8.3333333
1600 13.8888889
1700 13.8888889
1750 11.1111111
1800 11.1111111
1808 13.8888889
1950 13.8888889
2000 10.0
2050 6.3333333
2250 6.3333333
2260 8.3333333
2425 8.3333333
2431 5.5555556
2448 5.5555556
2665 5.5555556
2670 8.3333333
2710 8.3333333
```

Figura 59. Archivo circuito.dcd

Anexo III: Propiedades del vehículo

Para conocer la situación inicial del vehículo es necesario determinar las propiedades que lo definen. Esto ha sido posible gracias al Trabajo de Fin de Grado: Modelización y simulación de un vehículo eléctrico de altas prestaciones, trabajo previo que se mencionó en la memoria. En dicho trabajo se explica el procedimiento llevado a cabo para obtener las propiedades del vehículo que se necesitan introducir en el programa ADAMS/Car a la hora de crear el modelo.

En este anexo se resumen las propiedades de cada uno de los subsistemas que forman el modelo del vehículo.

III.1 Subsistema de las ruedas

Este subsistema está formado por un neumático de la marca Uniroyal y una llanta marca BullFace. A la hora de introducir los datos en el programa, se deben crear dos subsistemas, uno para las ruedas delanteras y otro para las traseras. En este caso ambos subsistemas serán iguales, ya que las cuatro ruedas poseen propiedades idénticas. Estas propiedades se muestran en la tabla 3.

RUEDAS	
Parámetro	Valor
Masa	28 kg
Rigidez vertical	400 N/mm
Rigidez lateral	190 N/mm
Amortiguación vertical	0,15 Ns/mm
Resistencia a la rodadura	0,015
Anchura	205 mm
Relación de aspecto	0,8
Radio sin carga	367 mm
Inercia Ixx	$1,73 \cdot 10^4 \text{ kgmm}^2$
Inercia Iyy	$1,73 \cdot 10^4 \text{ kgmm}^2$
Inercia Izz	$2,51 \cdot 10^4 \text{ kgmm}^2$
Offset	9,5 mm

Tabla 3. Propiedades del subsistema de las ruedas

III.2 Subsistema de tracción

Este subsistema está formado por un motor eléctrico BLDC (*Brushless Direct Current*) de la marca UQM y un reductor.

Al tratarse de un vehículo eléctrico no posee embrague ni caja de cambios, sin embargo el programa no está diseñado para el modelado de este tipo de vehículos, por lo que no permite eliminar estos componentes. De esta forma fue necesario adaptar sus propiedades para que se acercaran lo máximo posible a la tracción eléctrica.

Las características de este subsistema se muestran en la tabla 4.

TRACCIÓN ELÉCTRICA	
Parámetro	Valor
Masa	100 kg
Rpm ralentí	0 rpm
Rpm máximas	8.000 rpm
r primera marcha	1,41
r marcha atrás	-1,41
r reductor	4,5
Ganancia EMS	$5 \cdot 10^{-3}$
Aceleración máxima EMS	100%
Aceleración nula EMS	1%
J motor	32.258 kgmm^2
T máximo embrague	10^6 Nm
C embrague	10^6 Nmms/°
K embrague	10^8 Nmm/°
Γ embrague	$5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$
Punto 100% embragado	0,99
Punto 100% desembragado	1
T nominal	$2,5 \cdot 10^5 \text{ Nmm}$
T pico	$4 \cdot 10^5 \text{ Nmm}$
Inercia Ixx	$749.755,29 \text{ kgmm}^2$
Inercia Iyy	$809.877,25 \text{ kgmm}^2$
Inercia Izz	$711.755,29 \text{ kgmm}^2$

Tabla 4. Propiedades del subsistema de tracción

Además de estas características, es necesario introducir las curvas de Par-Rpm del conjunto del diferencial y la curva Par motor-Velocidad de giro del motor. Las características del diferencial no se han modificado, por lo que la curva Par-Rpm es la que introduce ADAMS/Car por defecto.

La curva Par motor- Rpm del motor se ha introducido para un nivel de carga de valor 1, obteniéndose la mostrada en la figura 60.

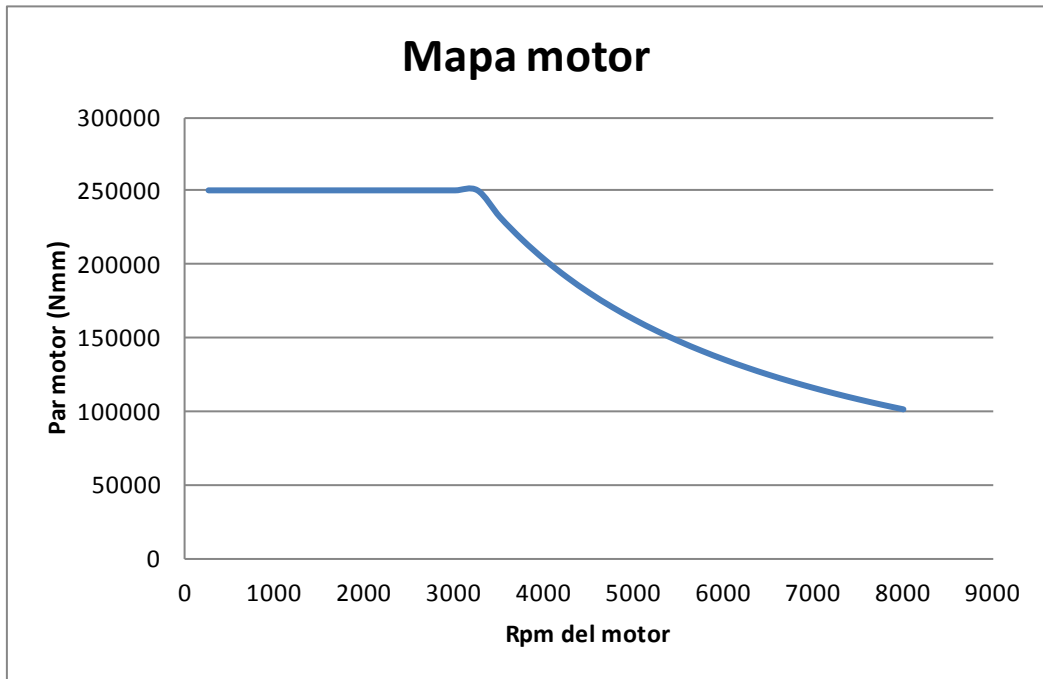


Figura 60. Curva del mapa motor

Para definir el mapa motor en ADAMS/Car es necesario introducir también el par de frenado para cada valor de Rpm del motor. Esto se observa en la tabla 5.

Rpm	T _{frenado} (Nmm)	T _{motor} (Nmm)
250	-250000	250000
500	-250000	250000
750	-250000	250000
1000	-250000	250000
1250	-250000	250000
1500	-250000	250000
1750	-250000	250000
2000	-250000	250000
2250	-250000	250000
2500	-250000	250000
2750	-250000	250000
3000	-250000	250000
3250	-250000	250000
3500	-231929	231929
3750	-216467	216467
4000	-202938	202938
4250	-191000	191000
4500	-180389	180389
4750	-170895	170895
5000	-162350	162350
5250	-154619	154619
5500	-147591	147591
5750	-141174	141174
6000	-135292	135292
6250	-129880	129880
6500	-124885	124885
6750	-120259	120259
7000	-115964	115964
7250	-111966	111966
7500	-108233	108233
7750	-104742	104742
8000	-101469	101469

Tabla 5. Mapa motor

III.3 Subsistema de los frenos

El vehículo posee frenos de disco tanto en el eje delantero como en el trasero. Para definir este subsistema hace falta un único archivo, a diferencia del subsistema de las ruedas. En este archivo se definen los cuatro discos de freno, pero permite dar valores distintos a cada parámetro para los discos delanteros y traseros. En este caso los cuatro discos de freno son iguales, por lo que sus propiedades son iguales para los discos delanteros y traseros.

ADAMS/Car no le asigna masa ni tampoco inercias a este subsistema. En la tabla 6 se muestran las características de este subsistema.

FRENOS	
Parámetro	Valor
Radio del disco	145 mm
Espesor del disco	12 mm
Anchura del cubo	30 mm
Desplazamiento del cubo	0 mm
Área de la pastilla	3.827 mm ²
Reparto de frenado	0,6
Coefficiente de rozamiento	0,4

Tabla 6. Propiedades del subsistema de los frenos

III.4 Subsistema de la dirección

Aunque el vehículo posee un sistema de dirección asistida, ADAMS/Car no permite su modelado. De esta forma se utilizó una dirección de columna-piñón-cremallera para la creación del modelo. Las propiedades de este subsistema se muestran en la tabla 7.

DIRECCIÓN	
Parámetro	Valor
Masa	48 kg
$n_{\text{volante/columna de dirección}}$	1
$n_{\text{columna de dirección/piñón}}$	1
$n_{\text{piñón/cremallera}}$	0,1745 °/mm
Desplazamiento cremallera máx.	100 mm
Fuerza cremallera máx.	500 N
Ángulo de giro máximo	720 °
Par de giro máximo	500 Nmm

Tabla 7. Propiedades del subsistema de dirección

III.5 Subsistema de la suspensión

Como sucedía con el subsistema de las ruedas, son necesarios dos archivos distintos para definir el subsistema de la suspensión, uno para la delantera y otro para la trasera. Las tablas 8 y 9 muestran las propiedades para la suspensión delantera y trasera respectivamente.

SUSPENSIÓN DELANTERA	
Parámetro	Valor
Masa	70 kg
Ángulo de convergencia	0 °
Ángulo de caída	1,25 °
Constante elástica	40 N/mm
L_{muelle} libre de carga	304 mm
L_{muelle} instalado	240 mm
Nº espiras muelle	5
Diámetro espiras	10 mm
Diámetro muelle	105 mm
Constante amortiguador Rd	2,5 Ns/mm

Tabla 8. Propiedades suspensión delantera

SUSPENSIÓN TRASERA	
Parámetro	Valor
Masa	120 kg
Ángulo de convergencia	0 °
Ángulo de caída	1,25 °
Constante elástica	57,5 N/mm
L_{muelle} libre de carga	334 mm
L_{muelle} instalado	250 mm
Nº espiras muelle	7
Diámetro espiras	15 mm
Diámetro muelle	110 mm
Constante amortiguador Rd	3,25 Ns/mm

Tabla 9. Propiedades suspensión trasera

III.6 Subsistema del chasis

Este subsistema está formado por la carrocería con el bastidor, 120 baterías y el resto de los componentes no mecánicos que posee el vehículo, además de dos ocupantes de 75 kg como establece la norma para el cálculo de cargas. Cada batería tiene una masa de 5,6 kg, lo que hace un total de 672 kg para todo el conjunto de baterías.

Las propiedades de este subsistema se muestran en la tabla 10.

CHASIS	
Parámetro	Valor
Masa	2.050 kg
Inercia Ixx	$3,65 \cdot 10^8 \text{ kgmm}^2$
Inercia Iyy	$1,43 \cdot 10^8 \text{ kgmm}^2$
Inercia Izz	$3,25 \cdot 10^8 \text{ kgmm}^2$
X cdg	1.444 mm
Y cdg	0 mm
Z cdg	729 mm
Coefficiente aerodinámico	0,35
Área frontal	$2.616.914 \text{ mm}^2$

Tabla 10. Propiedades del subsistema del chasis

Como se puede observar en la tabla 11, la masa total del modelo una vez unidos todos sus subsistemas es de 2.500 kg. Para crear la variante de mayor masa utilizada en este Trabajo de Fin de Grado se añadieron 300 kg, aproximadamente 50 baterías más, a la masa del chasis.

MASAS	
Subsistema	Valor (kg)
Ruedas	112
Tracción	100
Frenos	-
Dirección	48
Suspensión delantera	70
Suspensión trasera	120
Chasis	2.050
Total	2.500

Tabla 11. Reparto de masas del modelo