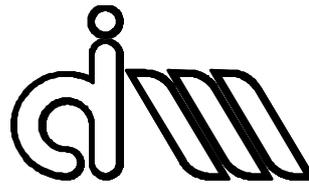


UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica

MODELIZACIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA LA SIMULACIÓN DE TRAYECTORIAS EN ADAMS

Presentado por: D. Teodoro Márquez Trujillo

Dirigido por: D. Francisco Valero Chuliá

Valencia, Julio de 2020

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA





Resumen

Actualmente, los vehículos eléctricos están adquiriendo cada vez una importancia mayor en nuestras vidas diarias gracias al confort, precisión y seguridad que otorgan, pero sobre todo por su nula contaminación ya que su fuente de alimentación es únicamente eléctrica por lo que no produce los gases de un motor de combustión interna perjudiciales para el medio ambiente. Por ello, en este trabajo, se realizará el modelado y simulación de un vehículo eléctrico en el programa ADAMS.

Para llevar a cabo el proyecto, se verá primero una introducción teórica sobre la historia de los vehículos eléctricos, así como sus principales componentes más característicos como puede ser el motor y su repercusión en el futuro, exponiendo las diferencias con un motor de combustión. Se continuará dando una explicación del programa que se usará, es decir, de ADAMS, el cual tiene bastantes derivaciones según la utilidad que necesitemos en un proyecto como puede ser el estudio del chasis, trayectoria, motor, suspensión, diseño, etc. En nuestro caso, se usará ADAMS Car ya que posee diversos modelos de vehículos y diferentes pruebas de simulación.

El siguiente punto será el modelado completo del vehículo, donde se seleccionarán las partes necesarias de uno de esos modelos comentados anteriormente y se modificará todo lo necesario para aproximarlos al vehículo que tenemos como objeto de estudio.

Finalmente, se llevarán a cabo las simulaciones correspondientes en las que se probará el vehículo en diversas pruebas como pueden ser de aceleración, frenado, paso por curva, cambio de carril y conducción por una trayectoria específica y así obtener los resultados y análisis de la variación de la posición, orientación, velocidad, aceleración del vehículo y las posibles fuerzas longitudinales, laterales y normales producidas en las ruedas.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA





Abstract

Currently, electric vehicles are becoming increasingly important in our daily lives thanks to the comfort, accuracy and safety they provide, but especially because they don't emit pollution since its power source is solely electric, so it does not produce exhaust gases like an internal combustion engine harmful to the environment. Therefore, in this work, the modeling and simulation of an electric vehicle in the ADAMS program will be carried out.

To carry out the project, we will first see a theoretical introduction about the history of electric vehicles, as well as its main most characteristic components such as the engine and its repercussion in the future, exposing the differences with a combustion engine. It will continue giving an explanation of the program that will be used, that is, ADAMS, which has many derivations depending on the utility we need in a project such as the study of the chassis, trajectory, engine, suspension, design, etc. In our case, ADAMS Car will be used, which has several vehicle models and different simulation test.

The next point will be the complete modeling of the vehicle, where the necessary parts of one of those models discussed above will be selected and everything necessary will be modified to get it closer to the vehicle that we have as an object of study.

Finally, the corresponding simulations will be carried out in which the vehicle will be tested in various tests such as acceleration, braking, constant radius cornering, lane change and driving along a specific path and thus obtain the results and análisis of the variation of the position, orientation, speed, acceleration of the vehicle and the possible longitudinal, lateral and normal forces produced in the wheels.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA





ÍNDICE GENERAL

1.- OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	1
1.1 Objetivo principal.....	1
1.2 Objetivos secundarios	1
2.- INTRODUCCIÓN TEÓRICA	3
2.1 Historia del vehículo eléctrico	3
2.2 Tesla Inc.....	9
2.2.1 Historia de Tesla, Inc.	9
2.2.2 Tipos de automóviles de Tesla.....	12
2.3 Diferencias entre un motor eléctrico y de combustión	15
2.4 Simulación por computadora.....	19
2.4.1 MSC ADAMS Car	21
3.- MODELIZACIÓN DEL VEHÍCULO RBK	22
3.1 Descripción del vehículo RBK	22
3.2 Consideraciones del diseño.....	24
3.3 Modelado en ADAMS Car	25
3.3.1 Carrocería.....	25
3.3.2 Ruedas	30
3.3.3 Sistema de Frenado.....	32
3.3.4 Motor y caja de cambios	34
3.3.5 Sistema de suspensión	36
3.3.5.1 Suspensión Frontal	40
3.3.5.2 Suspensión Trasera	41
3.3.6 Sistema de dirección.....	42
3.3.7 Driveline.....	44
3.3.8 Ensamblado completo del vehículo RBK	45
4.- SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO RBK	48
4.1 Aceleración	48
4.2 Frenado.....	50
4.3 Paso por curva (PPC).....	53
4.4 Cambio de carril (CDC)	65
4.5 Conducción por una trayectoria específica	71
5.- CONCLUSIONES Y RESULTADOS.....	85
BIBLIOGRAFÍA.....	87

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA





Índice de ilustraciones

2.1	Motor eléctrico de Jedlik	3
2.2	Coche eléctrico Thomas Parker	4
2.3	Le Jamais Contente	4
2.4	Estación de carga General Electric en EE.UU	5
2.5	Thomas Edison junto a su coche eléctrico	6
2.6	Citycar de Sebing-Vanguard	6
2.7	General Motors EV-1	7
2.8	Logo Tesla	9
2.9	Desempeño financiero de Tesla	11
2.10	Capital pagado de Tesla	11
2.11	Tesla Roadster	12
2.12	Tesla Roadster sport	13
2.13	Tesla Model S	13
2.14	Tesla Model X	14
2.15	Tesla Model 3	14
2.16	Partes motor de combustión	15
2.17	Partes motor eléctrico	16
2.18	Par motor Nissan Leaf y 1.6	17
2.19	Potencia Nissan Leaf y 1.6	18
3.1	Vehículo RBK a modelar	22
3.2	Geometría del vehículo RBK	23
3.3	Ballesta trasera	23
3.4	Ballesta delantera	23
3.5	Imagen de croquis del vehículo RBK en SolidWorks	25
3.6	Prototipo inicial de la carrocería	26
3.7	Carrocería acabada en SolidWorks	26
3.8	Plantilla carrocería pickup	27
3.9	Importación de la carrocería de SolidWorks	27
3.10	Carrocería en Adams Car	28
3.11	Masa e inercias chasis	29
3.12	Parámetros modificados rueda	31
3.13	Subsistema ruedas en Adams Car	31
3.14	Sistema de frenado	32
3.15	Subsistema de frenado en Adams Car	33
3.16	Ejemplo de las baterías de 48 V	34
3.17	Datos motor	35
3.18	Subsistema motor en Adams Car	35
3.19	Modelo de un cuarto de vehículo de 2 gdl	36
3.20	Tipos de masas en un vehículo	37
3.21	Ángulo de caída	37
3.22	Ángulo de convergencia/divergencia	38
3.23	Ángulo de avance	38
3.24	Hardpoints suspensión frontal	40
3.25	Subsistema suspensión frontal multibrazo en Adams Car	40



3.26	Hardpoints suspensión trasera	41
3.27	Ensamblaje suspensión trasera en Adams Car	41
3.28	Sistema de dirección	42
3.29	Hardpoints dirección	43
3.30	Subsistema de dirección en Adams Car	43
3.31	Hardpoints driveline	44
3.32	Subsistema driveline en Adams Car	44
3.33	Nuevo ensamblaje del vehículo RBK completo en Adams Car	45
3.34	Vehículo RBK completo en Adams Car	46
3.35	Estructura metálica del vehículo RBK en Adams Car	46
3.36	Vehículo RBK vista lateral en Adams Car	47
4.1	Condiciones prueba de aceleración	48
4.2	Acelerador en la prueba de aceleración	49
4.3	Aceleración del vehículo RBK en la prueba de aceleración	49
4.4	Condiciones prueba de frenado	50
4.5	Activación del freno en la prueba de frenado	51
4.6	Aceleración longitudinal en la prueba de frenado	51
4.7	Velocidad longitudinal en la prueba de frenado	52
4.8	Distancia recorrida del vehículo RBK en la prueba de frenado	52
4.9	Condiciones prueba paso por curva	53
4.10	Velocidad longitudinal en la prueba paso por curva	54
4.11	Variación del ángulo de guiñada prueba paso por curva	54
4.12	Fuerza longitudinal delantera (PPC)	55
4.13	Fuerza longitudinal trasera (PPC)	55
4.14	Fuerza lateral delantera (PPC)	56
4.15	Fuerza lateral trasera (PPC)	56
4.16	Fuerza normal delantera (PPC)	57
4.17	Fuerza normal trasera (PPC)	57
4.18	Ángulo de deriva vs fuerza lateral rueda izq-del (PPC)	58
4.19	Ajuste lineal rueda izq-del	59
4.20	Ángulo de deriva vs fuerza lateral rueda der-del (PPC)	59
4.21	Ajuste lineal rueda der-del	60
4.22	Ángulo de deriva vs fuerza lateral rueda izq-tras (PPC)	61
4.23	Ajuste lineal rueda izq-tras	62
4.24	Ángulo de deriva vs fuerza lateral rueda der-tras (PPC)	62
4.25	Ajuste lineal rueda der-tras	63
4.26	Ajuste lineal 4 ruedas	64
4.27	Condiciones en la prueba de cambio de carril	65
4.28	Giro del volante (CDC)	66
4.29	Desplazamiento lateral del vehículo RBK (CDC).....	66
4.30	Velocidad longitudinal (CDC)	67
4.31	Aceleración lateral (CDC)	67
4.32	Fuerzas longitudinales delanteras (CDC)	68
4.33	Fuerzas longitudinales traseras (CDC)	68
4.34	Fuerzas laterales delanteras (CDC)	69
4.35	Fuerzas laterales traseras (CDC).....	69
4.36	Fuerzas normales delanteras (CDC)	70



4.37	Fuerzas normales traseras (CDC)	70
4.38	Trayectoria específica en Adams Car	71
4.39	Creación de la trayectoria	72
4.40	Control de dirección mini-maniobra 1	73
4.41	Control del acelerador mini-maniobra 1	73
4.42	Condición final mini-maniobra 1	74
4.43	Control de dirección mini-maniobra 2	74
4.44	Control del acelerador mini-maniobra 2	75
4.45	Control de dirección mini-maniobra 3	75
4.46	Control de dirección mini-maniobra 4	76
4.47	Control de dirección mini-maniobra 5	76
4.48	Control del acelerador mini-maniobra 6	77
4.49	Condición final mini-maniobra 6	77
4.50	Condiciones de la simulación de la trayectoria	78
4.51	Velocidad longitudinal vehículo RBK en la trayectoria	78
4.52	Aceleración longitudinal vehículo RBK en la trayectoria	79
4.53	Aceleración lateral vehículo RBK en la trayectoria	79
4.54	Desplazamientos del vehículo RBK en la trayectoria	80
4.55	Ángulo de dirección del vehículo RBK en la trayectoria	80
4.56	Fuerzas longitudinales delanteras en la trayectoria	81
4.57	Fuerzas longitudinales traseras en la trayectoria	81
4.58	Fuerzas laterales delanteras en la trayectoria	82
4.59	Fuerzas laterales traseras en la trayectoria	82
4.60	Fuerzas normales delanteras en la trayectoria	83
4.61	Fuerzas normales traseras en la trayectoria	83
4.62	Ángulo de deriva ruedas delanteras en trayectoria	84



1.- OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1 Objetivo principal

El objetivo principal de este proyecto es la modelización de un vehículo eléctrico para la simulación de trayectorias mediante el programa ADAMS Car.

Para llevarlo a cabo, se buscará preparar dicho programa para realizar la simulación del comportamiento de nuestro vehículo, una vez modelado, en trayectorias establecidas dadas y comprobar su viabilidad mediante el análisis de los resultados y las fuerzas longitudinales, laterales y normales que se generan en las ruedas tanto delanteras como traseras.

Se pondrá especial atención en el comportamiento lateral de los neumáticos analizando sus constantes de rigidez lateral para cada uno de ellos y para las 4 ruedas simultáneamente.

Otro de los objetivos del proyecto era el ajuste de los parámetros físicos del modelo para que los resultados de las simulaciones fueran similares a los experimentales pero este objetivo no se ha podido llevar a cabo debido a la situación del COVID19.

1.2 Objetivos secundarios

Se realizarán una serie de pruebas de aceleración, frenado, paso por curva o cambio de carril para saber las prestaciones del vehículo durante esas simulaciones.

Se ampliarán los conocimientos sobre el programa ADAMS Car gracias a que, a lo largo del proyecto, se trabajará con dicho programa constantemente.



2.- INTRODUCCIÓN TEÓRICA

2.1 Historia del vehículo eléctrico

Por curioso que pueda parecer, la historia del vehículo eléctrico se inició mucho antes que la de su homólogo de combustión interna [8]. En el siglo XIX, las investigaciones sobre electromagnetismo avanzaron con rapidez y una de sus primeras aplicaciones prácticas fue motorizar vehículos. Tras varios experimentos de Jedlik, el cual desarrolló en 1828 el primer motor eléctrico formado por un estator, un rotor y un conmutador (Ilustración 2.1), o los de Joseph Henry, se consigue la primera maqueta de un vehículo eléctrico en miniatura de las manos de Thomas Davenport en 1834.

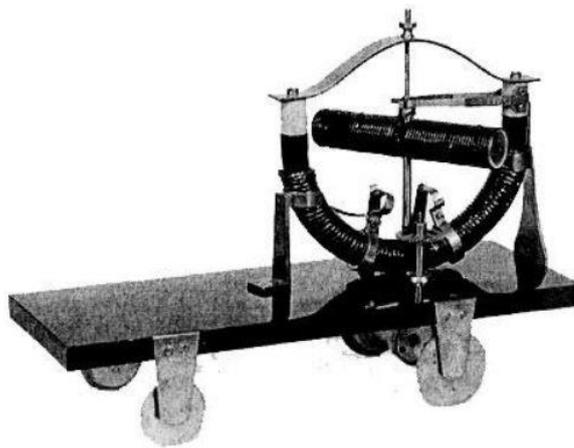


ILUSTRACIÓN 2.1 - MOTOR ELÉCTRICO DE JEDLIK [3]

En este tiempo, Robert Davidson diseñó lo que se conoce como el primer vehículo eléctrico en 1838, una locomotora eléctrica que llegó a alcanzar los 6 km/h, la fiebre de la motorización eléctrica acababa de empezar.

Más tarde, sin saber exactamente cuándo, entre 1832 y 1839, Robert Anderson, otro de los inventores de la época y empresario escocés, inventó el coche eléctrico puro al diseñar un carruaje de tracción eléctrica y pila de energía no recargable.

En 1859, Gaston Planté mejoró la primitiva pila eléctrica utilizada hasta esa época, inventando la batería de plomo-ácido, que se podía recargar gracias a la regeneración de las sustancias químicas gastadas haciendo pasar una corriente eléctrica en sentido inverso a través de ella. Camille Alphonse Faure, otro científico francés, mejoró el diseño de esa batería en 1881, añadiéndole unas placas formadas por una rejilla de plomo con pasta de dióxido de plomo. Sus mejoras aumentaron considerablemente la capacidad de las baterías y permitió directamente su fabricación a escala industrial.

Gran Bretaña y Francia fueron los países que dominaban el diseño y la fabricación de los vehículos eléctricos a finales del siglo XIX, donde Thomas Parker en Londres construyó la primera producción de coches eléctricos en 1884, usando sus propias baterías recargables de alta capacidad, especialmente diseñadas. En Alemania el primer coche eléctrico fue construido por el ingeniero Andreas Flocken en 1888, mientras que en Estados Unidos fue en 1890 por William Morrison, con un vehículo de seis plazas que alcanzaba una velocidad máxima de 22 km/h.



ILUSTRACIÓN 2.2 - COCHE ELÉCTRICO THOMAS PARKER [6]

Pero la verdadera invención eléctrica que maravilló a un mundo en constante desarrollo fue el récord de velocidad alcanzado el 29 de abril de 1899 por “La Jamais Contente”, un coche eléctrico que rompió la barrera de los 100 km/h, llegando a una velocidad máxima de 105,88 km/h.



ILUSTRACIÓN 2.3 – LE JAMAIS CONTENTE [7]

Se empezaron a usar estos vehículos para carreras y a comienzos del siglo XX eran los coches que más se vendían, superando a los de vapor o los de gasolina, ya que estos últimos eran muy ruidosos y contaminantes, pocos fiables y necesitaban una manivela para su arranque. El coche eléctrico era el favorito por ser fiable, por su simplicidad y suavidad, no hacía ruido, funcionaban bien y su autonomía era la adecuada para la época ya que era suficiente para circular en el día por la ciudad y recargarlos durante la noche.



ILUSTRACIÓN 2.4 – ESTACIÓN DE CARGA GENERAL ELECTRIC EN EE.UU [2]

La historia del vehículo eléctrico prosigue, entre los años 1908 y 1912, con un periodo de cierta inestabilidad. La mayor parte de los primeros vehículos eléctricos eran carros grandes y adornados, con interiores de lujo y estaban llenos de materiales costosos. Las ventas de estos vehículos alcanzaron su punto máximo al inicio de la década de 1910. Pero Henry Ford y su cadena de montaje en serie provocaron una bajada de precios en sus modelos de combustión, llegando al mayor sector de la población, la clase media. El proceso, iniciado en 1908, se basaba en la fabricación masiva, logrando vender el mismo coche que en 1909 costaba 600 dólares a 250 dólares en 1925.

Ante esta innovación industrial, el vehículo eléctrico tenía poco que hacer, aunque un avance del inventor Thomas Edison, al crear la batería de hierro-níquel, hizo que las previsiones de los coches eléctricos se dispararan. Pero Charles Ketterin, en 1912, patenta el arranque eléctrico lo que provocó que desapareciera uno de los puntos débiles del vehículo de combustión, el complicado y desagradable arranque a manivela. Todo esto, sumado a la creación de mejores carreteras que permitían mayor velocidad y necesidad de mayor autonomía, junto con la proliferación de yacimientos petrolíferos al sur de Estados Unidos, que originó el nacimiento de una potente industria, fueron aspectos imposibles de remontar por parte del vehículo eléctrico, motivando la elección del coche con motor de combustión por parte de la sociedad americana, y posteriormente, del resto del mundo.



ILUSTRACIÓN 2.5 – THOMAS EDISON JUNTO A SU COCHE ELÉCTRICO [6]

En los años 20, el coche eléctrico quedó restringido a las ciudades. Los pocos fabricantes que mantenían su producción no podían luchar con el resto de coches cuyo precio era tres veces menor. Esto hizo que desapareciera prácticamente, siendo utilizado en flotas municipales como taxis o con fines industriales como carretillas elevadoras o minicamionetas de reparto o incluso carritos de golf.

En los años 60-70 empiezan a aparecer de nuevo algunos modelos eléctricos como el CityCar de Sebring-Vanguard que vemos en la siguiente imagen:



ILUSTRACIÓN 2.6 – CITYCAR DE SEBRING-VANGUARD [1]

Con el apogeo de los coches de combustión, no solo los eléctricos quedaron en el olvido, sino que la mentalidad de sostenibilidad y eficiencia quedó en un segundo plano, y esto fue así hasta la primera crisis del petróleo en 1973, que desencadenó sucesivas cumbres internacionales y tratados, como el Protocolo de Kioto, donde se comenzaba a tener en cuenta el posible colapso de la humanidad si esta seguía malgastando los recursos naturales. Esto forzó a los fabricantes de coches a mejorar la eficiencia y reducir las emisiones contaminantes, al mismo tiempo que comenzó la búsqueda de alternativas al petróleo, una fuente de vital importancia en manos mayormente extranjeras que sufriría una segunda crisis en 1979.

Unos años más tarde, en 1990, se aprueba una nueva ley dictada por la California Air Resources Board (CARB) llamada “Zero Emission Mandate”, una ley que impulsaba a que los grandes fabricantes automovilísticos investigaran cómo hacer que sus vehículos no contaminaran, y la empresa General Motors lanza el prototipo Impact en el salón del automóvil de Los Ángeles, precursor del famoso EV-1. Este vehículo (EV-1) tenía un motor de 137 CV que permitía una velocidad máxima de 130 km/h y una autonomía de 250 km.

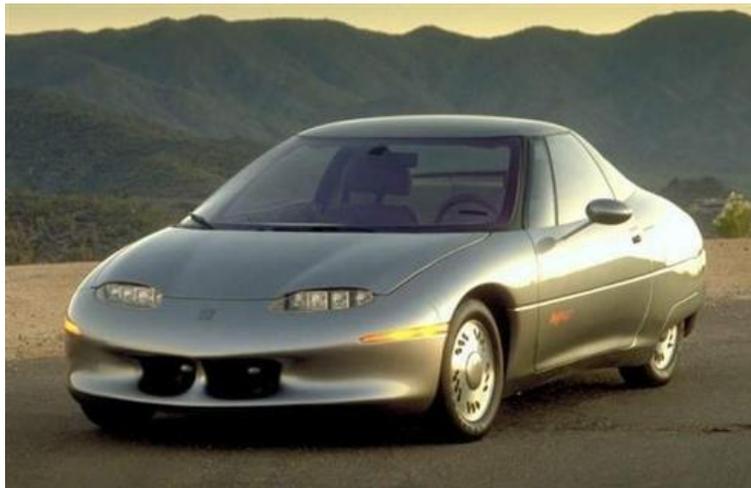


ILUSTRACIÓN 2.7 – GENERAL MOTORS EV-1 [1]

La intención de la administración californiana de que para el año 1998, los coches no emitieran contaminantes, produjo que otras compañías también presentaran sus proyectos como fue Toyota con el RAV4 EV, Honda y su berlina eléctrica EV Plus, Nissan Altra EV o el Ford Think o la pick up Ford Ranger EV. Todos estos vehículos ofrecen autonomía suficiente para el 90 % de los desplazamientos habituales de la población, sus prestaciones eran ya adecuadas y despertaron una contenida expectación.

Pese al éxito del automóvil eléctrico, los fabricantes acabaron saliéndose con la suya y lograron rebajar las exigencias de la Ley, cambiando coches de emisión cero por coches de bajas emisiones, dando lugar al coche híbrido. Curiosamente, el Gobierno de EE.UU luchó para eliminar la reforma de California y estos tuvieron que ceder por las presiones políticas a las que se enfrentaban, quedando patente la fuerza alcanzada por la industria petrolera, principal motivo del fracaso del coche eléctrico en los años noventa.



La mayoría de estos coches eléctricos, fueron reclamados por los fabricantes para deshabilitarlos o directamente desguazarlos ya que no se podían comprar, solo alquilar.

En cuanto al coche eléctrico actual, tuvo de nuevo su renacer debido a causas como la recesión económica mundial junto con los programas de reducción de emisiones y los gases de efecto invernadero, los problemas derivados del consumo de combustibles fósiles y la contaminación atmosférica en los entornos urbanos. El Toyota Prius fue el primer vehículo híbrido producido en serie, este coche ha sido un éxito de ventas desde su comercialización en 1997, aproximadamente se vendieron cerca de 18.000 unidades durante el primer año de producción.

Merece especial atención el Nissan Leaf, que tiene el honor de ser el vehículo eléctrico más vendido de la historia, aunque está muy cerca de ser superado por el Tesla Model 3 de Tesla. Más adelante se dedicará un apartado mostrando las comparaciones entre el Nissan Leaf y el Nissan 1.6, uno con motor puramente eléctrico y otro de combustión.

Actualmente, la empresa Tesla Inc., es una de las empresas más importantes en este sector, compañía de la que se hablará en el siguiente punto.

2.2 Tesla Inc.

Tesla, Inc., conocida anteriormente como Tesla Motors, es una compañía estadounidense fundada en julio de 2003, ubicada en Silicon Valley (California) y liderada por Elon Musk, dedicada al diseño, fabricación y venta de vehículos eléctricos, componentes para la propulsión de estos y baterías a gran escala. Su nombre se debe al físico e ingeniero Nikola Tesla.



ILUSTRACIÓN 2.8 – LOGO TESLA [10]

El núcleo de la compañía está sobre todo en la ingeniería del sistema de propulsión del vehículo eléctrico: motor, electrónica de potencia, caja de cambios y software de control que permite que todos los componentes formen un sistema bastante compacto y que contiene muchas menos piezas móviles que un motor térmico. Tesla usa motores de inducción de tres fases que incorporan un rotor y unos devanados de cobre optimizados para reducir la resistencia y la pérdida de energía. La electrónica de potencia gobierna el flujo de corriente de entrada y salida del paquete de baterías y también controla la generación de par motor durante la conducción y la recarga del paquete de baterías cuando está en carga.

2.2.1 Historia de Tesla, Inc.

Esta compañía nace en 2003 con la idea de producir vehículos eléctricos después de que *General Motors* anunciase la retirada de su modelo EV-1. La empresa *AC Propulsion* tenía dos equipos trabajando para el desarrollo de un prototipo eléctrico, uno de ellos formado por Martin Eberhad, Marc Tarpenning e Ian Wright y en el otro estaban Elon Musk y JB Straubel. El objetivo de este proyecto liderado por Tom Gage, era crear un vehículo impulsado por energía renovable por lo que ambos equipos se unieron para crear un buen coche y dar viabilidad a sus desarrollos. De esta forma se funda *Tesla Motors*, donde Elon Musk sería el principal inversor ya que había fundado varias empresas y era millonario por lo que tenía claro el objetivo. Martin Eberhard quedó como director ejecutivo (CEO) y JB Straubel como director de tecnología (CTO).



En la primera ronda de financiación se recaudó 7.5 millones de dólares, la mayor parte fue invertida por Musk, aunque había algunos otros inversores como *SDL Ventures* y *Compass Technology Partners*. En la segunda ronda, Musk invirtió 13 millones de dólares. Eberhad era el que dirigía la empresa los primeros años mientras que Musk supervisaba el diseño del coche y Straubel la mecánica de este. Así salió adelante el primer prototipo del Tesla Roadster, basado en el Lotus Elise. Una tercera ronda de inversión fue de 40 millones de dólares de Musk junto con otros inversores. El objetivo era demostrar que el vehículo eléctrico podría competir con las mejores marcas de coches deportivos. En mayo de 2007 llega la cuarta ronda de otros 45 millones de dólares acumulando un total de 105 millones de dólares en inversiones. Justo un mes después, en junio, el CEO de *Flextronics*, Michael Marks, es nombrado temporalmente CEO de Tesla por Musk para sustituir a Eberhard hasta que en diciembre es reemplazado por Ze'ev Drori, fundador de una empresa electrónica. En enero Eberhard y varios ejecutivos son despedidos y más tarde otros cuantos trabajadores debido al excesivo gasto en 2007.

Aun así, en enero de 2008, la agencia dependiente del gobierno de Estados Unidos (NHTSA) tiene que salvar a Tesla de la quiebra aportando 43 millones de dólares, ya que desde su creación, solo generaba pérdidas. En febrero llega la quinta ronda de financiación con 40 millones de dólares. La empresa ya había recibido unos 145 millones de los cuales 74 millones eran de Elon Musk. A finales de año, Tesla no consigue recaudar los 100 millones de dólares que necesitaba para subsistir, por lo que Musk se pone como CEO y Ze'ev Drori pasa a vicepresidente hasta que abandona la compañía en diciembre.

En enero de 2009, Tesla obtiene una subvención del Departamento de Energía de los Estados Unidos por lo que dice obtener beneficios a partir del segundo semestre. Cuando peor estaba la situación, Daimler AG adquiere casi el 10% de las acciones de esta empresa y ambos acuerdan cooperar en sistemas de baterías, sistemas de propulsión para vehículos eléctricos y proyección de vehículos, hasta 2014 que acabó el contrato y vendió sus acciones.

En julio de 2009, Tesla recibe un préstamo de 465 millones de dólares del Departamento de Energía de EE. UU de nuevo, debido a un programa de ayuda para tecnologías avanzadas para vehículos llamado *Advanced Technology Vehicles Manufacturing Loan Program* (ATVM). Gracias a este préstamo, Tesla Motors se pudo salvar de nuevo y fue invertido en su Model S.

En septiembre de 2009, Tesla anunció otra ronda de financiación de 82.5 millones de dólares, pero esta vez Elon Musk no contribuyó, sí lo hicieron *Daimler AG*, *Fjord Capital Partners* y *Aabar* entre otros. Hasta la fecha, se invirtieron 783,5 millones de dólares en la compañía.

A continuación, se verán dos gráficas del ejercicio financiero de Tesla y del capital pagado:

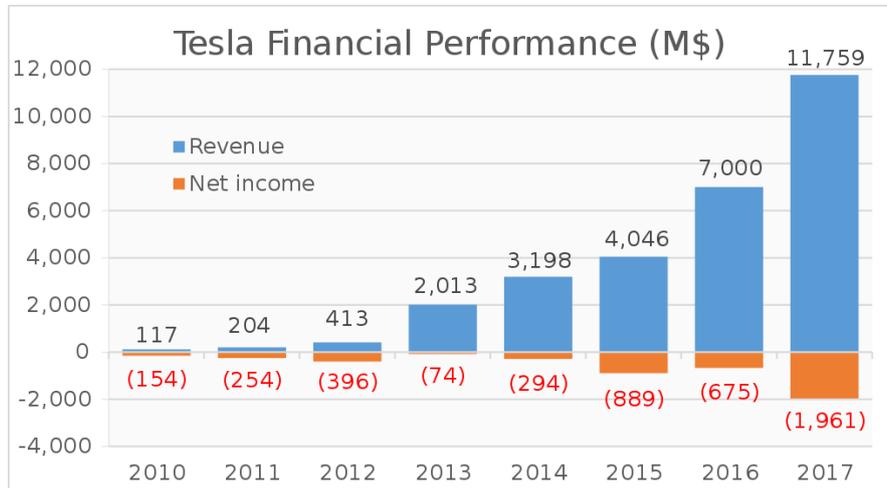


ILUSTRACIÓN 2.9 – DESEMPEÑO FINANCIERO DE TESLA [11]

En esta primera gráfica, podemos observar cómo la compañía va teniendo un aumento de ingresos a lo largo de los años, pero sin embargo el beneficio neto es negativo, por lo que se tienen pérdidas todos los años, siendo perjudicial para la empresa como se dijo en apartados anteriores.

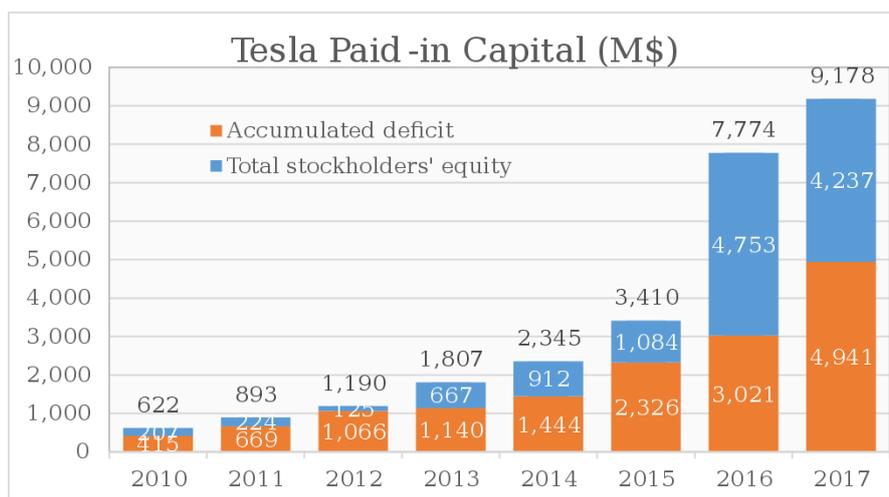


ILUSTRACIÓN 2.10 – CAPITAL PAGADO DE TESLA [11]

En esta otra gráfica, vemos ese déficit que se va acumulando debido a que el ingreso neto es negativo en color naranja y las inversiones de los accionistas en azul, los cuáles van en aumento cada año, posiblemente debido a que los vehículos eléctricos cada vez están adquiriendo más importancia en nuestro mundo actual.

Con respecto a la salida a bolsa, la compañía la solicitó el 29 de enero de 2010 y fue el 29 de junio de ese mismo año cuando Tesla Motors salió a bolsa en la NASDAQ con el acrónimo de TSLA, siendo el primer fabricante de coches estadounidense en salir a bolsa desde 1956 en que lo hizo *Ford Motor Company*. La oferta pública consiguió 226 millones de dólares para la compañía.

Salió a bolsa a 17 USD pero a final de 2012, la acción valía 33.82 USD y el valor de mercado 3.8 mil millones de dólares estadounidenses. El valor cada vez ha ido incrementando de una manera brutal, hasta llegar 302 USD por acción cotizada y una capitalización bursátil de 51.9 mil millones de USD el 15 de enero de 2019, superando de esta forma la valoración de *Ford Motor Company* que era de 44.9 mil millones de USD. Otro dato importante fue que a lo largo de 2017 y 2018, según el índice BrandZ [13], Tesla Motors fue la empresa automovilística que más incrementó su valor de marca.

2.2.2 Tipos de automóviles de Tesla

- **Tesla Roadster**: Fue el primer coche de la compañía y el primer automóvil de serie que usando baterías de iones de litio obtiene una autonomía de más de 322 km por carga. Tiene una potencia de 248 CV y acelera de 0 a 100 km/h en 3.9 segundos y según el análisis medioambiental de Tesla Motors es el doble de eficiente que el Toyota Prius. Su precio es aproximadamente 96.000 euros dependiendo de extras y demás. La producción en serie se inició en 2008 y se vendieron sobre 2100 Tesla Roadster en 31 países hasta junio de 2012. Este vehículo tiene un motor de corriente alterna AC que deriva directamente del diseño original de Tesla en 1882.



ILUSTRACIÓN 2.11 – TESLA ROADSTER [14]

- **Tesla Roadster Sport:** Es una versión mejorada del anterior. Acelera de 0 a 100 km/h en 3.7 s a diferencia de los 3.9 del Roadster normal. Su precio es de unos 112.000 euros. Las entregas comenzaron en julio de 2009.



ILUSTRACIÓN 2.12 – TESLA ROADSTER SPORT [14]

- **Tesla Model S:** Es una berlina eléctrica de alta gama que comenzó sus entregas en julio de 2012. La producción anual es de 50.000 unidades. Tiene una autonomía de 338 km y 507 en ciclo EPA (modo ecológico). Consigue acelerar de 0 a 100 km/h entre 5,8 y 2,3 segundos según la versión. La versión de tracción trasera tiene un motor eléctrico con una caja reductora, mientras que la versión de tracción integral equipa dos motores eléctricos con una caja reductora cada uno. La potencia máxima combinada total va desde 320 a 613 CV según versión. La carrocería es de aluminio reforzada con elementos de acero al boro. Se puede encontrar desde los 80.000 €.



ILUSTRACIÓN 2.13 – TESLA MODEL S [15]

- **Tesla Model X:** Este vehículo es una mezcla entre monovolumen y SUV, todoterreno eléctrico basado en la plataforma del Model S. Inició sus entregas en septiembre de 2015. Este modelo está equipado con dos motores con una caja reductora de una sola velocidad cada uno, un conjunto en el eje delantero y otro en el trasero, proporcionándole tracción integral de 4x4. Tiene una autonomía entre 322 y 465 km y potencia máxima combinada total de 332 a 540 CV. Su coeficiente aerodinámico es de 0,24, de los más bajos de su categoría. Tiene una aceleración de 0-100 km/h desde 4.6 a 3.2s y lo podemos encontrar desde 86.000€.



ILUSTRACIÓN 2.14 – TESLA MODEL X [19]

- **Tesla Model 3:** Este cuarto modelo, se empieza a comercializar desde julio de 2017, con un precio base de 35.000 USD. Posee una autonomía superior a los 354 km según el ciclo EPA y una aceleración de 0 a 100 km/h de 5,6 a 3,4 s según versión. Velocidad máxima entre 210 y 249 km/h según versión. Tiene un maletero detrás y otro delante. En las pruebas de seguridad este coche obtuvo 5 estrellas en todas ellas y en todas las categorías y está próximo a convertirse en el vehículo eléctrico más vendido de la historia.



ILUSTRACIÓN 2.15 – TESLA MODEL 3 [17]

2.3 Diferencias entre un motor eléctrico y de combustión

En este apartado se tratará fundamentalmente las características más importantes de cada motor en particular y sus diferencias.

En un motor de gasolina, el movimiento se produce debido a la quema y explosión controlada de este combustible dentro del cilindro. El aire y la gasolina vaporizada combustionan con una chispa eléctrica y la fuerza de esta explosión empuja el pistón. Si multiplicamos esa presión a la que está sometida el pistón por su superficie, obtenemos una fuerza. Esa fuerza si la multiplicamos por la distancia al eje geométrico de giro del árbol del cigüeñal (aunque la línea de acción también puede pasar por el eje), se convierte en el par motor que se puede generar. En este tipo de motores, la eficiencia energética es la relación entre la energía contenida en el combustible y la energía mecánica ofrecida. Su rendimiento es muy inferior a los motores eléctricos, ya que la combustión genera mucho calor que no es aprovechable y son necesarias muchas piezas móviles que generan pérdidas por rozamientos. La mayor parte de la energía se pierde en forma de calor, ya sea a través del radiador, escape, bloque motor, etc. En general, se estima que estos motores tienen un rendimiento del 25% para el motor de gasolina y un 30% para los motores diésel.

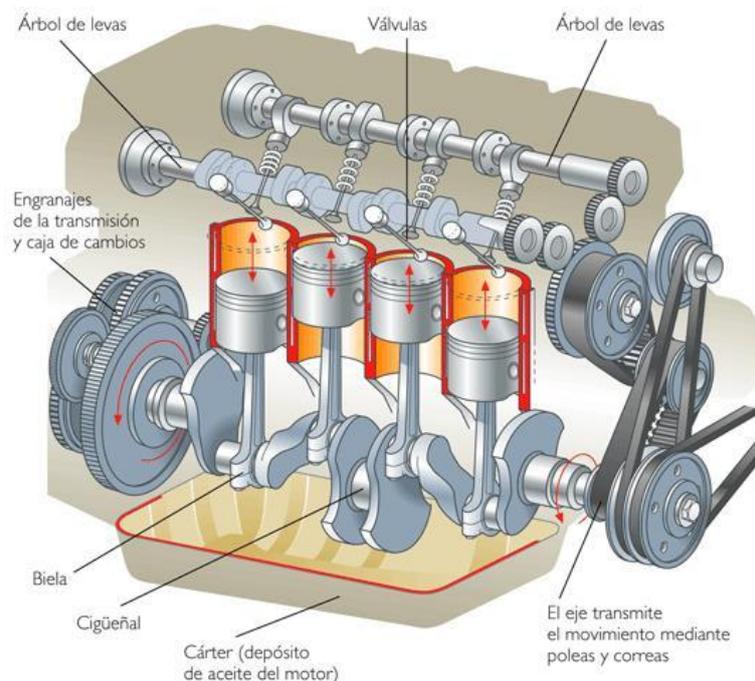


ILUSTRACIÓN 2.16 – PARTES MOTOR DE COMBUSTIÓN [23]

Los vehículos eléctricos son mucho más simples, mecánicamente hablando. Son muy fiables, aprovechando sobre el 90% de la energía que consumen. También tienen la ventaja de no requerir apenas mantenimiento, y en términos de rendimiento ofrecen una curva de par plana, especialmente a bajas revoluciones y todo ello sin ruidos ni vibraciones. Las baterías de estos coches determinan la potencia que puede usar el motor, la autonomía total del coche y su diseño. También permite recuperar energía del frenado, transformando la energía cinética del movimiento en energía eléctrica que se almacena en las baterías. En estos motores no es necesaria una caja de cambios ni un embrague ya que el motor puede trabajar en un rango de velocidades suficientemente amplio.

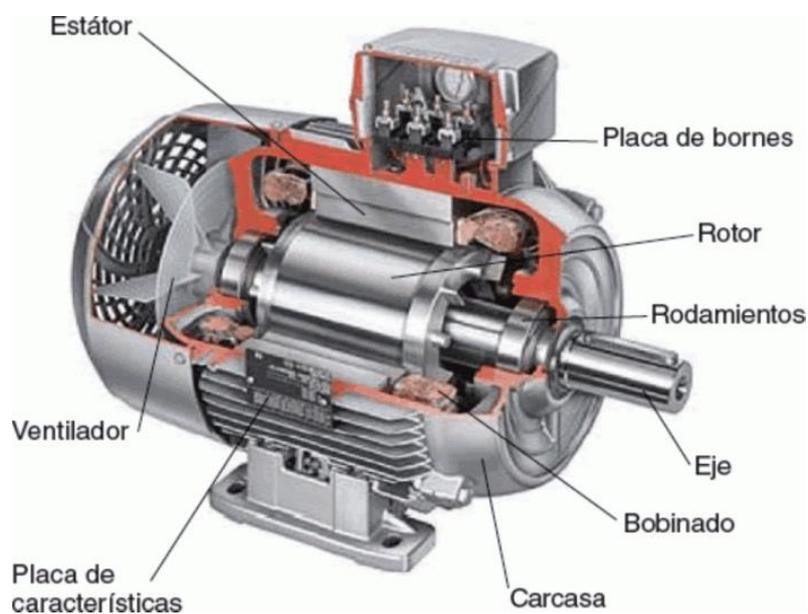


ILUSTRACIÓN 2.17 – PARTES MOTOR ELÉCTRICO [21]

Al accionar el acelerador, se activan una serie de resistencias o potenciómetros que transmiten la señal al controlador para que este sepa cuánta energía debe mandar al motor. Aquí debemos tener en cuenta que dicho controlador puede enviar numerosos niveles de potencia con los que el conductor podrá ir regulando la velocidad según accione más o menos, pero a mayor velocidad, mayor gasto de batería. Una vez se envía esa potencia al motor, el paso de la corriente eléctrica por los arrollamientos crea un campo magnético que gira en el estator, es decir, el elemento conductor que este tiene en su interior tiende a moverse cuando recibe la corriente eléctrica al crearse un campo magnético. A continuación, este campo magnético que gira en el estator arrastra al campo magnético fijo del rotor y le hace girar, siendo el movimiento del rotor el que permite que la energía mueva las ruedas del vehículo.

Con respecto a las gráficas de potencia y par de dichos motores, vemos a continuación una comparativa entre un motor eléctrico y un motor de gasolina de 1600 cm³. Ambos motores son de un Nissan de 109 CV de potencia:



ILUSTRACIÓN 2.18 – PAR MOTOR NISSAN LEAF Y 1.6 [20]

En esta gráfica de par motor, se puede ver como el motor eléctrico genera par instantáneo desde el primer momento, lo que supone una aceleración mayor que los modelos de combustión, esto se debe a que el paso de corriente es continuo y uniforme. Este par se mantiene constante hasta unas determinadas rpm en las que empieza a decaer paulatinamente con el régimen. Sin embargo, en el motor de combustión, el par máximo se consigue sobre 3000-4000 rpm y después decae hasta llegar a 6500 rpm donde la gasolina se corta.

Otro factor diferenciador importante es que el motor térmico es incapaz de girar por debajo del régimen de ralentí (aprox. 800 rpm) ya que el giro se vuelve inestable y se cala. En cambio, el eléctrico es capaz de girar igual de equilibrado y con el mismo par a 20 rpm que a 2000 rpm, de hecho, desde 0 rpm ya dispone del par máximo. El motor eléctrico no necesita girar cuando el vehículo está parado, ni un embrague para iniciar la marcha.

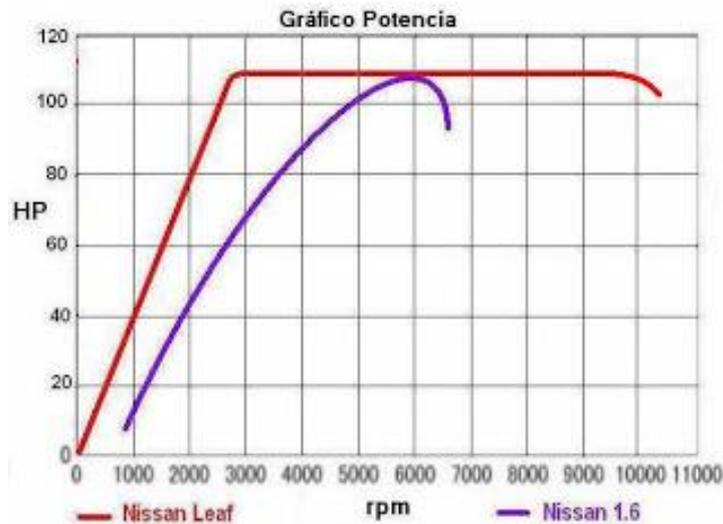


ILUSTRACIÓN 2.19 – POTENCIA NISSAN LEAF Y 1.6 [20]

En esta gráfica de potencia, se puede observar como la potencia máxima es la misma, pero en realidad el motor eléctrico es más potente: hasta 1000 rpm ofrece más del triple de potencia, hasta 2000 rpm más del doble y aunque las curvas se van acercando hacia las 6000 rpm, el de gasolina corta a 6500 rpm y el del Leaf aún ofrece su potencia máxima hasta 9800 rpm y gira hasta las 10400 rpm. Por lo que se puede concluir que los motores eléctricos son mucho más potentes que los de combustión con unas condiciones equivalentes.

A continuación, se hará una tabla indicando las ventajas y desventajas más representativas de cada tipo de motor:

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor eficiencia del motor - Cero emisiones - Silenciosos - Menor coste de la energía - Menor coste de mantenimiento - Frenado regenerativo 	<ul style="list-style-type: none"> - Peso de las baterías - Vida útil de las baterías - Tiempo de carga - Precio del coche
VEHÍCULOS DE COMBUSTIÓN	<ul style="list-style-type: none"> - Avance y evolución - Alta densidad de energía - Autonomía y tiempo de carga 	<ul style="list-style-type: none"> - Eficiencia del motor - Muy ruidosos - Mayores costes de mantenimiento - Motor más pesado - Sistema de transmisión complejo



2.4 Simulación por computadora

Según la referencia [24], una simulación por computadora es un programa informático o una red de ordenadores cuyo fin es crear una simulación de un modelo abstracto de un determinado sistema. Las simulaciones por computadora se han convertido en una parte relevante y útil de los modelos matemáticos de muchos sistemas naturales de ciencias como la física, geofísica, astrofísica, química y la biología; así como de sistemas humanos de economía, psicología y ciencias sociales. Además, se emplea en el diseño de nueva tecnología para llegar a comprender mejor su funcionamiento.

Las simulaciones por ordenador abarcan desde programas informáticos cuya ejecución dura unos minutos hasta conjuntos de ordenadores conectados en red cuya ejecución dura horas, e incluso hay simulaciones que se extienden varios días. La variedad de acontecimientos que se pueden recrear mediante simulaciones por computadora ha superado con creces las posibilidades del modelo matemático tradicional de lápiz y papel.

Para crear modelos de la realidad se emplea el modelado matemático. Un modelo matemático trata de encontrar soluciones analíticas a las ecuaciones que gobiernan los procesos que se suponen responsables del sistema que se estudia y del cual se tienen observaciones metódicas. El objetivo es validar esas ecuaciones y posibilitar la predicción del comportamiento del sistema partiendo de un conjunto de parámetros y condiciones iniciales. Los modelos numéricos resultaron de utilizar los ordenadores con el mismo propósito, resolver las ecuaciones no de forma analítica sino numérica.

Aunque las simulaciones por computadora emplean algunos algoritmos de modelos matemáticos, los ordenadores pueden, además, combinar las simulaciones con la realidad o con acontecimientos reales tales como la generación de respuestas de entrada o la simulación de sujetos de prueba que no están ya presentes. Mientras que los sujetos de prueba ausentes son fruto de la simulación o modelación, el sistema que utilizan podría ser el equipo real, lo cual serviría para revelar los límites de rendimiento o los defectos tras un uso continuado gracias a estos usuarios simulados.

El término *simulación por computadora* es más amplio que el de *modelado por ordenador*, ya que este último implica que todos los aspectos se modelan en la representación del ordenador. Sin embargo, *simulación por computadora* también incluye generar entradas de usuarios simulados para ejecutar un software de ordenador real o un equipo y solo se modela una parte del sistema. Un ejemplo de esto serían los simuladores de vuelo que pueden ejecutar tanto máquinas como software de vuelo real.

Las simulaciones por computadora se emplean en muchos campos, incluida la ciencia, la tecnología, el entretenimiento y la planificación de negocios.

La entrada y salida de estos datos para la simulación pueden realizarse a través de documentos de texto formateados o de un procesador para antes y después de la simulación. La preparación de los datos es, probablemente, la parte más importante de la simulación por computadora. Como la simulación es digital, al producirse los inevitables errores de redondear o truncar cifras, incluso el error más pequeño en los datos originales



puede transformarse en un error grave más adelante en la simulación. Aunque todos los análisis informáticos están sujetos al GIGO (entrada falsa/salida falsa), este se produce de manera especial en la simulación por computadora.

Todos estos modelos computacionales pueden clasificarse atendiendo a distintos pares de atributos: Estocástico o determinista, estático o dinámico, continuo o discreto y local o distribuido:

- Los modelos de simulación dinámica cambian en un sistema en respuesta a señales de entrada.
- Los modelos estocásticos emplean generadores de números aleatorios para simular el azar o una serie de acontecimientos aleatorios.
- Una simulación de un acontecimiento discreto manipula los acontecimientos en el tiempo. La mayoría de las simulaciones por computadora de tests de lógica y arborigramas de fallos son de este tipo. Aquí, el simulador tiene una lista de acontecimientos ordenados por el tiempo al que deberían suceder. El simulador lee la lista y activa nuevos acontecimientos a medida que se procesa otro.
- La simulación de movimiento continuo proporciona una solución numérica a ecuaciones diferenciales algebraicas o ecuaciones diferenciales. A intervalos regulares, el programa de simulación resuelve todas las ecuaciones y utiliza los números para cambiar el estado y la salida de la simulación.
- Los modelos distribuidos se ejecutan en una red de ordenadores interconectados, posiblemente a través de internet. A este tipo de simulaciones dispersas en distintos ordenadores centrales se las conoce con el nombre de “simulaciones distribuidas”.

En nuestro caso, nos basamos más bien en la ingeniería asistida por computadora (CAE) que es la disciplina que se encarga del conjunto de programas informáticos que permiten analizar y simular los diseños de ingeniería realizados con el ordenador, o creados de otro modo e introducidos en el ordenador, para valorar sus características, propiedades, viabilidad y rentabilidad. Su finalidad es optimizar su desarrollo y consecuentes costos de fabricación y reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado. La base de todas ellas se presenta como módulos o extensiones de aplicaciones CAD, que incorporan análisis cinemático, análisis por el método de elementos finitos, maquinado por control numérico CNC, exportación de ficheros “Stl” para máquinas de prototipado rápido y CAD.



2.4.1 MSC ADAMS Car

MSC Adams es la denominación comercial de un software que realiza análisis sobre mecanismos. Se compone de varios módulos que permiten hacer simulaciones del funcionamiento por medio de animaciones, realizar análisis de vibraciones, realizar análisis de esfuerzos, etc. Algunos de esos módulos son:

- Adams View para realizar simulaciones de un mecanismo.
- Adams Solver que genera los cálculos para la solución de un mecanismo.
- Adams Engine para la simulación de un motor.
- Adams Car que simula la dinámica de un automóvil.

Adams Car será el programa que se utilizará para llevar a cabo nuestro modelado y nuestras simulaciones a lo largo de este proyecto.

Este software está especializado en la modelización de vehículos y permite crear prototipos virtuales de los subsistemas que forman un vehículo y analizar esos prototipos virtuales tal y como podríamos analizar los prototipos físicamente.

Con este programa también se podrá crear ensamblajes definiendo los subsistemas del vehículo, como por ejemplo las suspensiones frontales y traseras, el sistema de dirección, el chasis o el sistema de frenado, y vehículos completos, para posteriormente analizarlos y conocer su comportamiento. Además, con el acceso en modo experto, Adams ofrece la posibilidad de basar los subsistemas en plantillas creadas por uno mismo.

Cuando se analiza el comportamiento de un ensamblaje, Adams car aplica al análisis las condiciones que el usuario quiera imponer. Por ejemplo, en el análisis del comportamiento de una suspensión, se puede imponer condiciones como:

- Mover las ruedas a través de un recorrido impuesto y medir la convergencia, la inclinación, la velocidad de la rueda, etc.
- Aplicar una carga lateral y un par de alineamiento en la huella de contacto del neumático con la calzada y medir el ángulo de convergencia y de caída.
- Girar el volante un ángulo determinado y medir los ángulos girados por las ruedas y el ángulo de Ackerman.

Conociendo estos resultados, se podrá modificar la geometría de la suspensión, los muelles o incluso los amortiguadores y volver a analizar ese comportamiento para determinar los efectos de dichas alteraciones.

En nuestro caso, realizaremos simulaciones únicamente del vehículo completo ensamblado para analizar su comportamiento y/o el de sus subsistemas.

3.- MODELIZACIÓN DEL VEHÍCULO RBK

3.1 Descripción del vehículo RBK

El vehículo que se modelará será un vehículo eléctrico para transporte interno que estará alimentado por una celda de combustible de hidrógeno y varias baterías, en concreto, serán 8 baterías convencionales de 48 voltios y 30 amperios cada una, que otorgará a este vehículo incluso la opción de operación de forma autónoma.



ILUSTRACIÓN 3.1 – VEHÍCULO RBK A MODELAR

Sus características principales son:

- Tracción trasera y suspensión compuesta por dos ballestas traseras y una ballesta transversal delantera.
- La dirección es delantera y tiene unos frenos de tambor traseros solamente.
- Tiene 3,3 kW de potencia.
- Posee una masa de 690 kg.
- Su velocidad máxima es de 32 km/h.
- Longitud total de 2,66 m.
- Anchura de 1,23 m y altura de 1,70 m.
- Distancia entre ejes $L = 1,65$ m.
- Altura del centro de gravedad (G) $h = 0,50$ m.
- Distancia desde G al eje delantero $L_a = 1,10$ m.
- Distancia desde G al eje trasero $L_b = 0,55$ m.

Las características geométricas anteriores las podemos ver representadas en la siguiente imagen más ilustrativa:

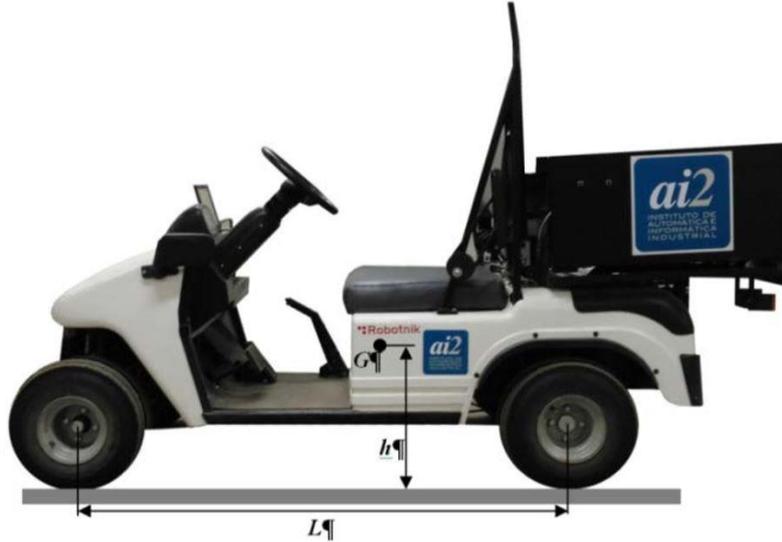


ILUSTRACIÓN 3.2 – GEOMETRÍA DEL VEHÍCULO RBK [27]

A continuación, se verán ilustradas las suspensiones que posee el vehículo tanto traseras como delanteras comentadas anteriormente:



ILUSTRACIÓN 3.3 – BALLESTA TRASERA



ILUSTRACIÓN 3.4 – BALLESTA DELANTERA



3.2 Consideraciones del diseño

Para realizar el modelado del vehículo RBK, se ha tenido en cuenta varias condiciones de diseño que se listarán a continuación:

- Se seleccionarán los subsistemas ya creados por ADAMS Car como pueden ser las ruedas, suspensiones, dirección o motor y se modificarán las partes necesarias para aproximarlos lo máximo posible a la realidad.
- Gracias a que tenemos este vehículo físicamente, se podrá realizar las mediciones necesarias para la modelización de las geometrías de los subsistemas que se crean oportunas.
- El chasis se creará desde cero mediante el programa de CAD llamado SolidWorks con las medidas geométricas aportadas en el apartado anterior pero solo tendrá función estética ya que no tendremos en cuenta la aerodinámica del vehículo.
- La suspensión delantera se ajustará con unos valores de un amortiguador convencional.
- La suspensión trasera será la de ballestas que viene por defecto en ADAMS Car.
- El sistema de frenado será solamente trasero, que se modelará con frenos de disco en vez de tambor ya que no existe este modelo en ADAMS Car.
- Algunos datos como pueden ser las inercias o los pesos de diferentes componentes del vehículo se estimarán, debido a la imposibilidad de conocer con exactitud dichos valores y a su complejidad.

3.3 Modelado en ADAMS Car

3.3.1 Carrocería

La carrocería es el subsistema del vehículo que proporciona la estructura básica del automóvil. Sobre ella se sitúan los pasajeros y la carga del vehículo, además de otros subsistemas como pueden ser el motor, suspensión, transmisión o la dirección. Existen diferentes tipos de carrocería dependiendo de su construcción (autoportante, tubular o de chasis independiente), de su volumen (monovolumen, dos o tres volúmenes) y según su forma (sedán, tres o cinco puertas, familiares o coupé entre otras).

Es importante diferenciar entre el chasis y carrocería. El chasis es la estructura interna del vehículo que aporta rigidez y da forma a un vehículo en su construcción y uso y sobre la cual se apoya la carrocería. Es análogo al esqueleto de un animal.

Para realizar la modelización de la carrocería de nuestro vehículo RBK, se diseñará desde SolidWorks un modelo lo más aproximado posible para poder luego exportarlo al programa ADAMS Car. Lo primero que se hará para poder dibujarlo más exactamente será abrir una imagen de croquis del perfil de dicho vehículo y trabajar sobre él realizando el croquis según las líneas de esa imagen como vemos a continuación:



ILUSTRACIÓN 3.5 – IMAGEN DE CROQUIS DEL VEHÍCULO RBK EN SOLIDWORKS

Este diseño se centrará únicamente en la carrocería por lo que no se dibujarán las ruedas ya que estas forman parte de otro subsistema distinto al de la carrocería. Este modelo en 3D estará reproducido a escala real por lo que no será necesario escalar el diseño y todas las medidas aplicadas serán a tamaño real.

Una vez tenemos el croquis, se extruirá para darle volumen hasta el valor de la anchura que se vio en el apartado anterior de especificaciones técnicas, quedando de la siguiente forma:

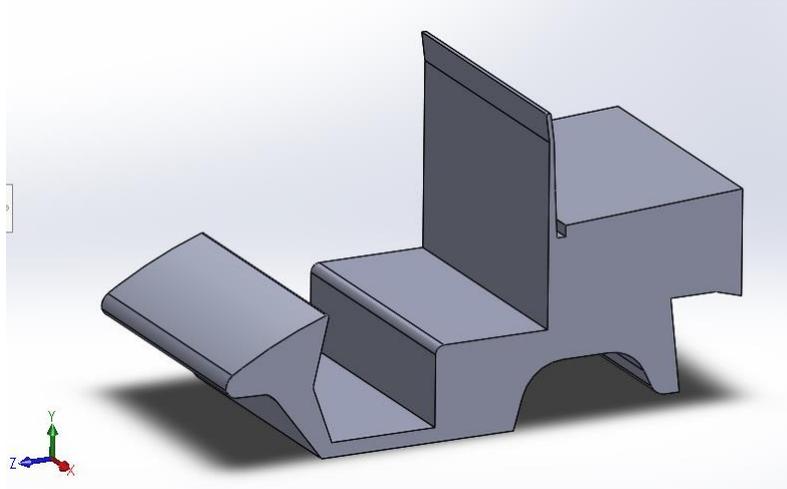


ILUSTRACIÓN 3.6 – PROTOTIPO INICIAL DE LA CARROCERÍA

Finalmente, haciéndole los respectivos ajustes y modificaciones, así como dándole las apariencias convenientes para aproximarlo más al modelo real, se quedaría de la siguiente forma:

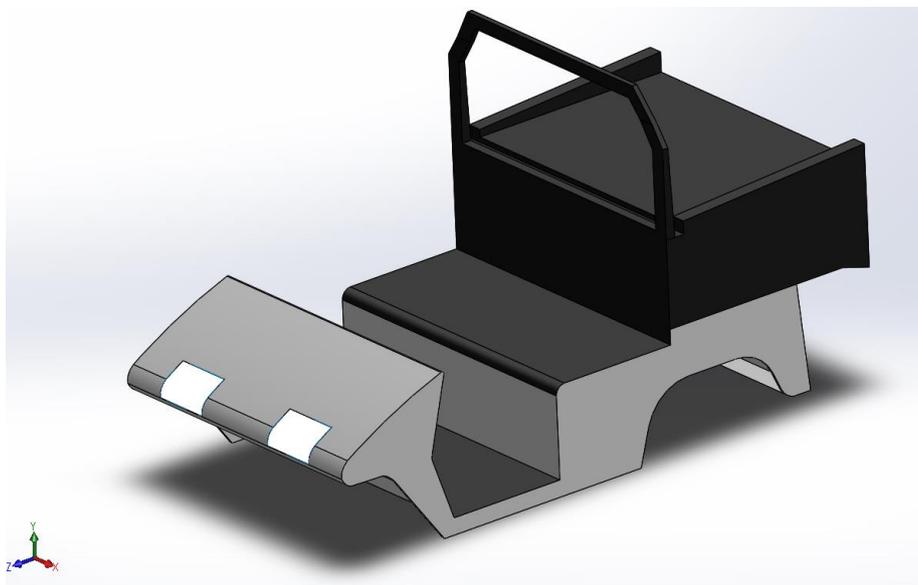


ILUSTRACIÓN 3.7 – CARROCERÍA ACABADA EN SOLIDWORKS

Una vez tenemos ya el modelado de la carrocería en SolidWorks, el siguiente paso será guardar el archivo en el formato parasolid (.x_t) ya que ADAMS Car posee una mayor compatibilidad con los diseños guardados en este formato.

Teniendo ya el modelo guardado en este formato, se procederá a importarlo en el programa ADAMS Car y para ello se iniciará en el modo *Template Builder* ya que en este modo se permite al usuario crear y modificar las distintas plantillas que más adelante formarán los subsistemas de nuestro vehículo RBK. Para poder realizar la plantilla del vehículo en cuestión, se abrirá un modelo ya creado por el programa como es la carrocería de un vehículo pickup (*_rigid_chassis_pickup*):



ILUSTRACIÓN 3.8 – PLANTILLA CARROCERÍA PICKUP

A continuación, se ocultará la antigua carrocería y después se importará la nueva que se diseñó en SolidWorks de la siguiente forma que se ve en la imagen:

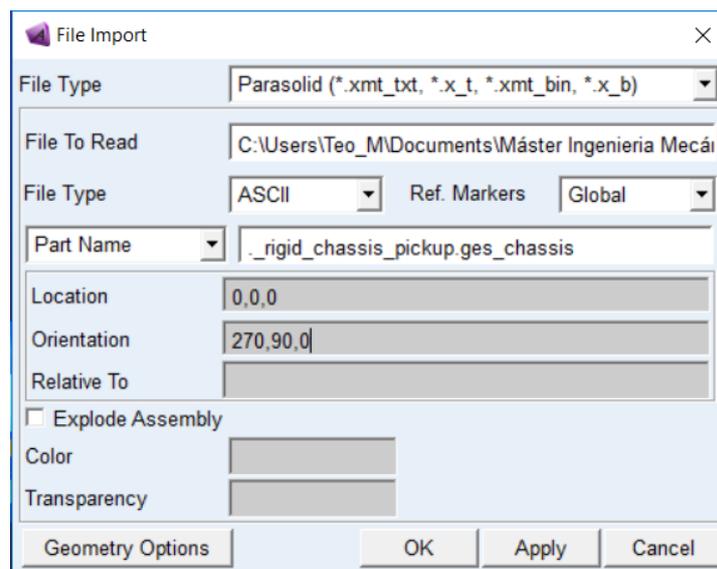


ILUSTRACIÓN 3.9 – IMPORTACIÓN DE LA CARROCERÍA DE SOLIDWORKS

Como se puede observar, se ha tenido que modificar la orientación 270 grados con respecto al eje X y 90 grados con respecto el eje Y para hacerlo coincidir con los ejes de la manera deseada. La carrocería importada en ADAMS Car se ve de la siguiente forma:

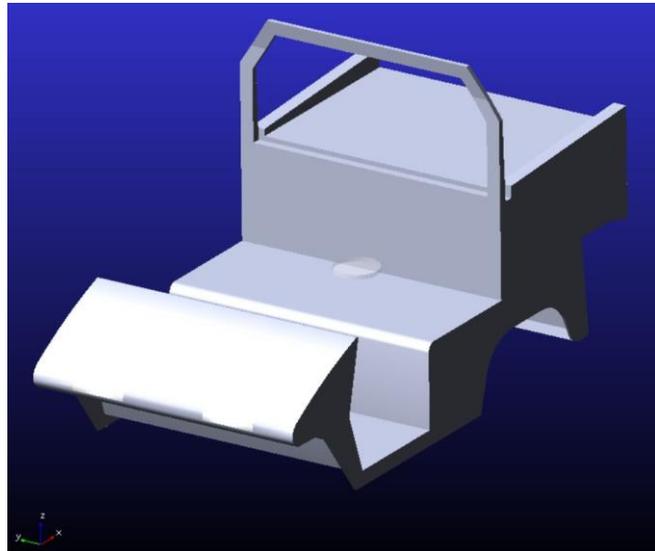


ILUSTRACIÓN 3.10 – CARROCERÍA EN ADAMS CAR

Una vez importada la nueva carrocería, esta plantilla tendrá nuestro diseño del vehículo RBK, pero con todos los parámetros, comunicadores, partes y montajes de la plantilla inicial que se eligió del vehículo pickup. Se guardará con el nombre *Carroceria_RBK*.

Como se dijo en el apartado anterior, la geometría de la carrocería no influirá en los resultados, ya que no se tendrá en cuenta el coeficiente aerodinámico. Lo que si se modificará será la masa e inercias de esta por lo que se partirá de la hipótesis de que nuestro vehículo RBK tiene forma de paralelepípedo, con las dimensiones reales del vehículo expuestas en el apartado 3.1.

Se usarán las siguientes ecuaciones para calcular la inercia:

$$I_{xx} = 1/12 \cdot \text{Masa} \cdot (h^2 + a^2) = 2,5317 \cdot 10^8 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

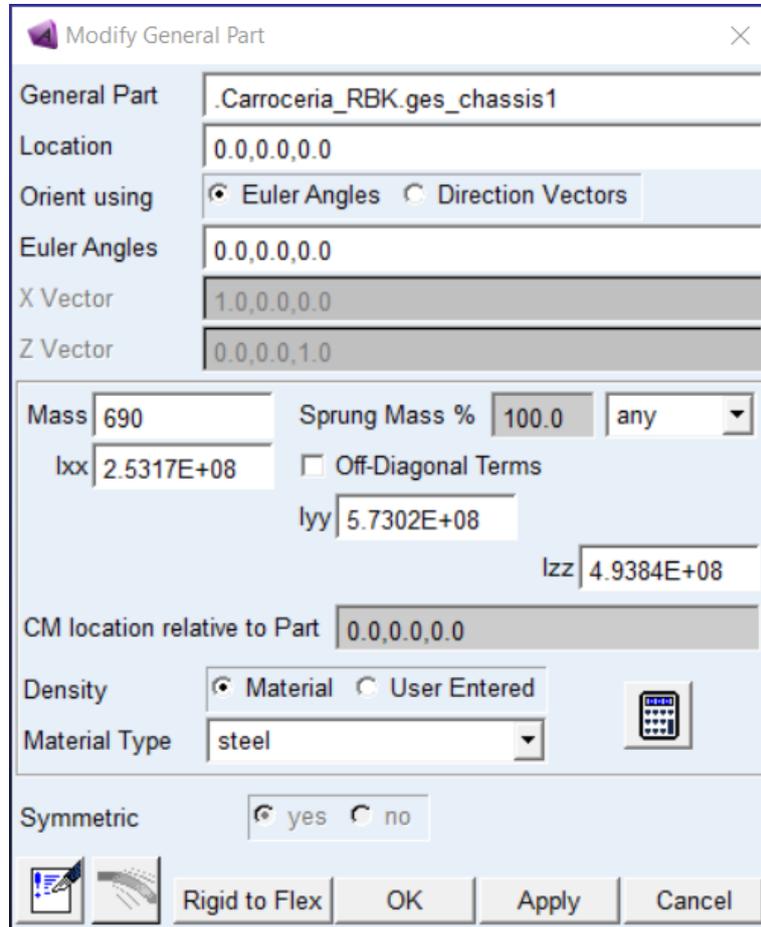
$$I_{yy} = 1/12 \cdot \text{Masa} \cdot (h^2 + l^2) = 5,7302 \cdot 10^8 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

$$I_{zz} = 1/12 \cdot \text{Masa} \cdot (l^2 + a^2) = 4,9384 \cdot 10^8 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

Dónde:

- Masa es la masa del vehículo RBK = 690 kg
- l es el largo del vehículo RBK = 2660 mm
- h es la altura del vehículo RBK = 1700 mm
- a es la anchura del vehículo RBK = 1230 mm

Cuando ya se tienen los datos de inercias calculados, se introducen en ADAMS Car seleccionando la parte de *ges_chassis1* y modificándola de la siguiente forma:



General Part	.Carroceria_RBK.ges_chassis1		
Location	0.0,0.0,0.0		
Orient using	<input checked="" type="radio"/> Euler Angles <input type="radio"/> Direction Vectors		
Euler Angles	0.0,0.0,0.0		
X Vector	1.0,0.0,0.0		
Z Vector	0.0,0.0,1.0		
Mass	690	Sprung Mass %	100.0
lxx	2.5317E+08	any	
	<input type="checkbox"/> Off-Diagonal Terms		
lyy	5.7302E+08		
lzz	4.9384E+08		
CM location relative to Part	0.0,0.0,0.0		
Density	<input checked="" type="radio"/> Material <input type="radio"/> User Entered		
Material Type	steel		
Symmetric	<input checked="" type="radio"/> yes <input type="radio"/> no		

ILUSTRACIÓN 3.11 – MASA E INERCIAS CHASIS

Finalmente, se guardará el nuevo subsistema creado de la carrocería de nuestro vehículo en cuestión.



3.3.2 Ruedas

Las ruedas es uno de los elementos más importantes de un vehículo ya que constituyen el único elemento de unión entre el vehículo y la calzada, por lo que estas forman parte del sistema de transmisión de potencia, dirección y suspensión. La rueda es un conjunto formado por el neumático, el cual se aloja sobre las llantas y debe estar en contacto permanente con el suelo, y la llanta que da forma a dicho neumático, la cual suele ser metálica. Este conjunto puede estar unido a la transmisión o girar libremente, dependiendo de si son ruedas motrices o no.

Los principales objetivos que tienen las ruedas son:

- Estabilizar el vehículo durante la frenada
- Mejorar la eficacia de la suspensión
- Asegurar y mantener la dirección del vehículo en su trayectoria
- Transmitir la potencia motriz del motor a la calzada
- Soportar las diferentes cargas que pueda haber en un vehículo
- Generar y transmitir las fuerzas laterales necesarias para realizar giros en las curvas.

Para realizar el modelado de las ruedas tanto delanteras como traseras de nuestro vehículo RBK, se usará un proceso distinto al anterior ya que se modificarán los archivos de texto que crea ADAMS Car sobre los subsistemas.

El primer paso será abrir una plantilla de unas ruedas creada ya por el programa similares a las nuestras. En nuestro caso, se usará la plantilla llamada *_handling_tire*. Seguidamente, se guardará el archivo con el nombre de *ruedas*, en este caso no se hará distinción entre ruedas frontales y traseras ya que ambas serán iguales, pero en el caso que no lo fueran, se tendría que hacer distinción entre unas y otras para tener diferente plantilla y así modificarlas independientemente.

Una vez creada esa plantilla, se creará los subsistemas respectivos para ruedas frontales y ruedas traseras, respectivamente. A continuación, en el menú *Browse* de ADAMS Car, se abrirán los siguientes submenús *Force elements* → *Tires* → *tir/til_wheel*. Después se abrirá la información del elemento y se abrirá la ruta del archivo *Property File*, el cual contiene las propiedades del neumático.

Cuando ya se ha abierto este archivo mediante un editor de texto, se modificarán los parámetros necesarios para adecuar tanto la geometría como las propiedades de las ruedas. En nuestro caso, los parámetros se han modificado de la siguiente forma:

```

[DIMENSION]
UNLOADED_RADIUS      = 220.00
WIDTH                = 185.00
ASPECT_RATIO        = 0.48
$-----vertical
[PARAMETER]
VERTICAL_STIFFNESS   = 300.0
VERTICAL_DAMPING     = 3.1
LATERAL_STIFFNESS    = 190.0
ROLLING_RESISTANCE   = 0.0

```

ILUSTRACIÓN 3.12 – PARÁMETROS MODIFICADOS RUEDA

El resto de los parámetros no se han modificado ya que no se ha podido obtener dicha información sobre nuestro modelo. Una vez que se ha modificado el archivo y guardado, se guardará el subsistema de las ruedas.

El proceso utilizado ha sido igual tanto para las ruedas frontales como para las traseras y ambos datos, en nuestro caso, también han sido iguales.

A continuación, se mostrará el diseño de las ruedas en Adams Car:

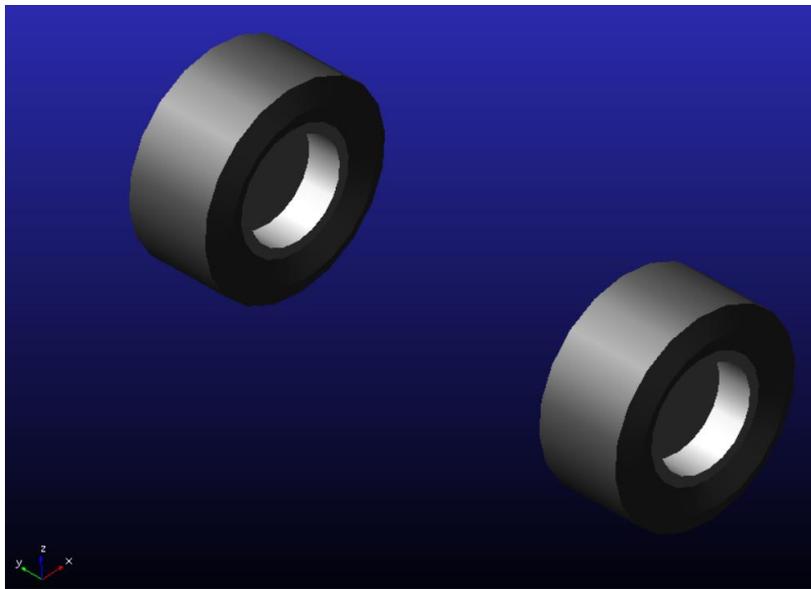


ILUSTRACIÓN 3.13 – SUBSISTEMA RUEDAS EN ADAMS CAR

Aunque las ruedas frontales y traseras sean iguales, se han guardado con distinto nombre: las frontales como *RuedasFront_RBK* y las traseras como *RuedasRear_RBK*.

3.3.3 Sistema de Frenado

El sistema de frenos de un vehículo es un sistema mecánico que está destinado a reducir la energía cinética de este cuando sea necesario mediante la disipación de energía. En el caso de los frenos de fricción, la energía se transforma en calor mediante el rozamiento con deslizamiento entre superficies, normalmente una metálica, fundición gris nodular de grafito laminar y otra de un material específico que se denominará material de fricción. Para conseguir que las temperaturas de funcionamiento no superen los valores admisibles por los materiales, el calor generado se debe disipar en el ambiente condicionando el diseño de los frenos.

Los requerimientos normalmente exigidos a los frenos y que condicionan los tipos constructivos y los materiales empleados son:

- Estabilidad en la frenada: Entendida como un par resistente constante como respuesta a una fuerza de accionamiento constante.
- Capacidad de dosificación de la energía a disipar: La respuesta del freno debe ser sensible a la acción de mando para poder dosificar el par de frenado dentro de un rango amplio.
- Mantenimiento reducido: Garantizar periodos largos entre revisiones y operaciones de mantenimiento sencillas.

En los frenos de fricción, el funcionamiento está basado en el rozamiento entre dos superficies en contacto con deslizamiento, siendo determinante para el comportamiento del freno los materiales y las formas de las superficies. Los tipos más usados son los frenos de disco y los de tambor, que se dividen estos últimos en los de tambor de zapata interna y externa.

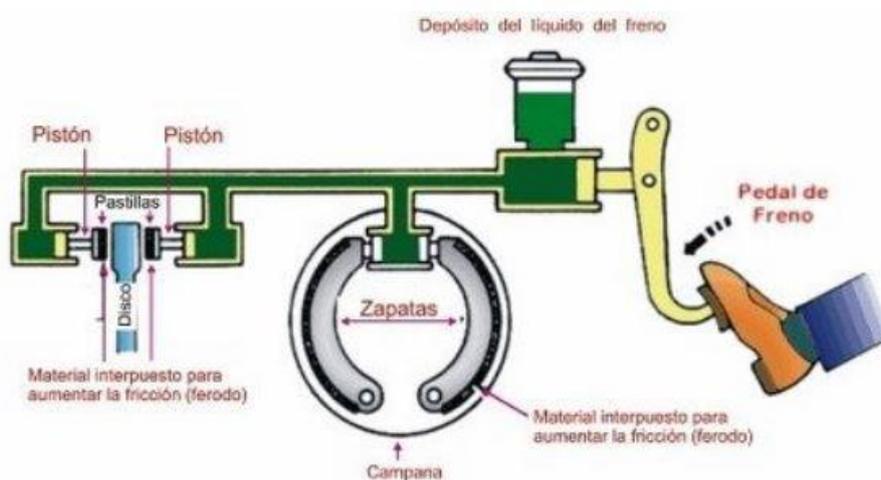


ILUSTRACIÓN 3.14 – SISTEMA DE FRENADO [31]

En nuestro caso, como ya dijimos anteriormente, el vehículo RBK lleva unos frenos de tambor traseros solamente, pero se modelará con un sistema de frenos de disco ya que el programa ADAMS Car no incorpora ningún ejemplo de frenos tipo tambor y se desconoce la forma de poder modelarlo en dicho programa. Por lo tanto, se tomará la hipótesis de que nuestro vehículo posee frenos de disco y se tratará de modificarlos de tal forma que tengan un comportamiento lo más cercano posible a la realidad.

Para ello, se cogerá el modelo ya creado por Adams Car llamado *_brake_system_4Wdisk_calipers* y se modificará los parámetros encontrados en el menú *Browse* → *Parameter Variables*.

Los frenos delanteros tendrán un coeficiente de fricción con valor 0 ya que nuestro vehículo no posee frenos delanteros.

Una vez modificados los parámetros necesarios, se guardará la plantilla con el nombre *SistemaFrenadoRear_RBK*, quedando como la mostrada en la siguiente imagen:

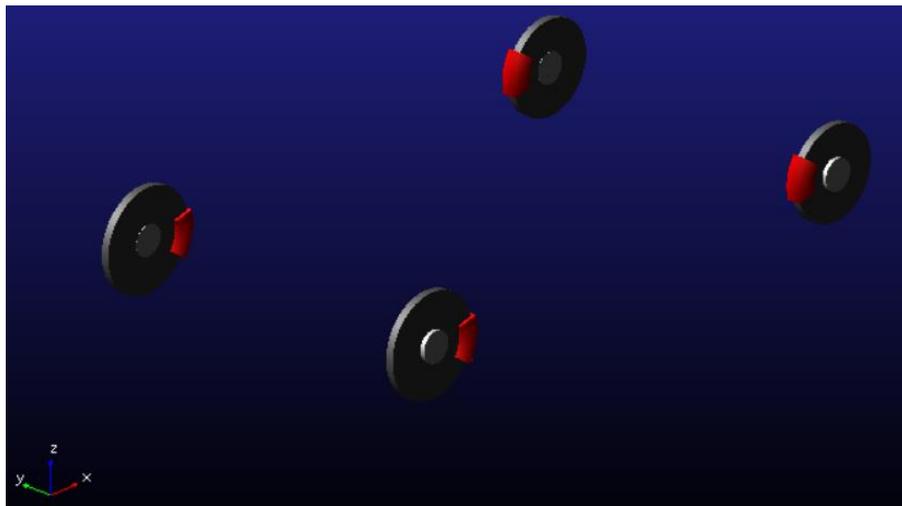


ILUSTRACIÓN 3.15 – SUBSISTEMA DE FRENADO EN ADAMS CAR

3.3.4 Motor y caja de cambios

Como ya se dijo anteriormente, nuestro vehículo posee motor eléctrico por lo que no es necesario una caja de cambios. A diferencia de los motores de combustión, estos motores eléctricos poseen un rango de velocidad de giro mucho mayor. La velocidad mínima del motor eléctrico es de 0 rpm y su máxima aproximadamente de 12000 rpm mientras que la de un motor de combustión, el rango oscila entre 1000 y unas 6000 rpm. Al no tener caja de cambios, el sistema de tracción es mucho menos complejo que en uno de combustión lo que supone también menos problemas mecánicos y se ahorraría en dinero y peso con respecto a este aspecto.

En la siguiente imagen se verá un ejemplo de las 8 baterías de litio de 48 V que se encuentran situadas justo debajo de los asientos y son las encargadas de proporcionar los 3300 Watios de potencia a nuestro vehículo:



ILUSTRACIÓN 3.16 – EJEMPLO DE LAS BATERÍAS DE 48 V [32]

Para llevar a cabo el modelado de nuestro motor eléctrico, se cogerá un ejemplo de un motor en Adams Car, en concreto se cogerá el subsistema que podemos encontrar en la biblioteca *concept* del programa, llamado *engine_transmission_longitudinal*.

Para acceder a este subsistema, iniciaremos el programa en el modo *standard interface* y después lo cargaremos abriéndolo mediante *File* → *Open* → *Subsystem* y busquemos en la carpeta *concept* el subsistema nombrado.

Una vez que ya lo tenemos cargado, se modificarán algunos datos para ajustarlo a la realidad. Para ello, se irá a la parte de *Adjust* del menú y seguidamente a *Powertrain Properties*. A continuación, en la casilla de *Powertrain Configuration* se marcará la opción de *Simple Proportional Torque* ya que no tendremos marchas, sino un par causado por el motor eléctrico desde el momento 0.

La potencia máxima que tenemos es de 3,3kW que corresponde a $3,3 \cdot 10^9 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2/\text{s}^3$ que son las unidades en las que estamos trabajando en Adams Car.

Para calcular el par máximo, se dividirá esa potencia máxima, expresada en vatios, entre la velocidad de giro que se cogerá un valor de 1500 rpm equivalentes a $50\pi \text{ rad/s}$, dando un valor de 21 Nm. Ese par lo multiplicaremos por la relación de transmisión la cuál en un vehículo eléctrico como este puede estar en 9, con lo que el resultado final de par que introduciremos en ADAMS Car será de $1,89 \cdot 10^5 \text{ Nmm}$.

A continuación, vemos los datos introducidos:

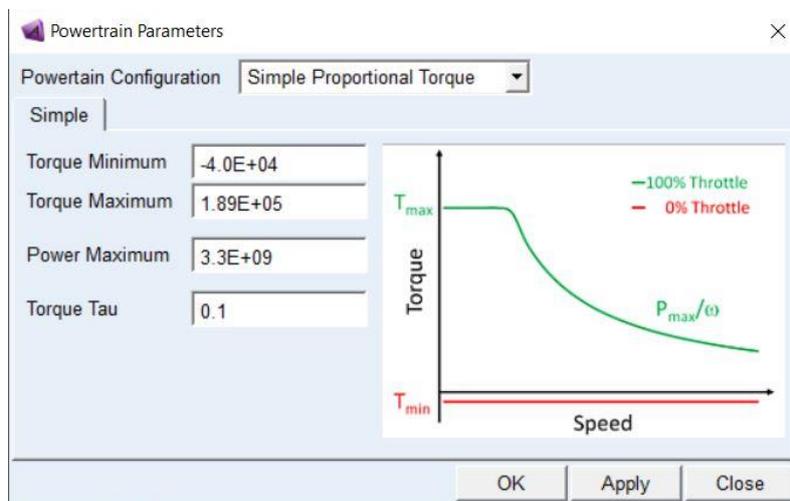


ILUSTRACIÓN 3.17 – DATOS MOTOR

Una vez introducidos los datos y aplicarlos, se guardará el subsistema correspondiente al motor de nuestro vehículo con el nombre *Motor_longitudinal_RBK*, el cual se puede ver en la siguiente imagen modelado en el programa ADAMS Car:

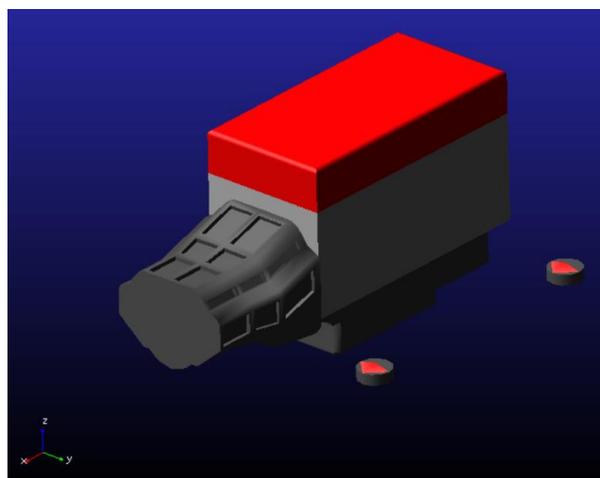


ILUSTRACIÓN 3.18 – SUBSISTEMA MOTOR EN ADAMS CAR

3.3.5 Sistema de suspensión

El sistema de suspensión de un automóvil tiene como finalidad absorber las irregularidades del terreno por el que se circula para poder controlar el vehículo, aumentar la comodidad y, sobre todo, mantener el contacto neumático-terreno en cualquier momento ya que, si el neumático se despegaba de la carretera, no tendríamos ese control sobre nuestro vehículo. También otra de las funciones importantes que tiene este sistema es reaccionar a las fuerzas de control que se transmiten desde la huella de contacto del neumático tales como las fuerzas longitudinales, laterales y pares de frenado y dirección.

Para el estudio de las suspensiones, se considerará el vehículo como dos masas diferentes. En primer lugar, están las masas suspendidas que es la parte de la masa del vehículo que es soportada por el sistema de suspensión. Estaría constituida por el chasis, motor, carrocería, etc., además de la carga y ocupantes del vehículo. En segundo lugar, tendríamos la masa no suspendida que es la formada por el sistema de suspensión y los elementos que conectan dicho sistema con el terreno como pueden ser las ruedas, los frenos del vehículo siempre y cuando estén incluidos fuera del chasis, elementos de transmisión, ejes, etc.

En la siguiente imagen se puede ver la representación de un modelo de cuarto de vehículo de 2 grados de libertad con sus respectivas masas suspendidas y no suspendidas:

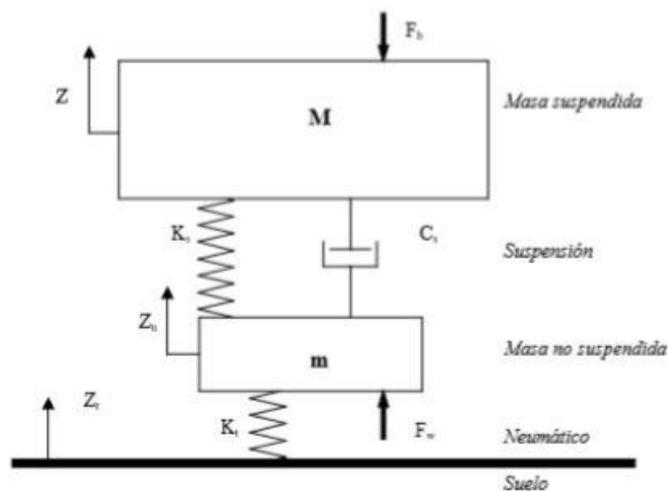


ILUSTRACIÓN 3.19 – MODELO DE UN CUARTO DE VEHÍCULO DE 2 GDL [44]

Todo sistema de suspensión en los vehículos automóviles debe tener dos cualidades fundamentales: la elasticidad para evitar golpes secos en el chasis debido a las irregularidades del terreno; y la amortiguación, que impida un excesivo balanceo de los elementos de suspensión que se transmita al resto del vehículo.

A continuación, se verá una imagen más representativa de las masas habladas:

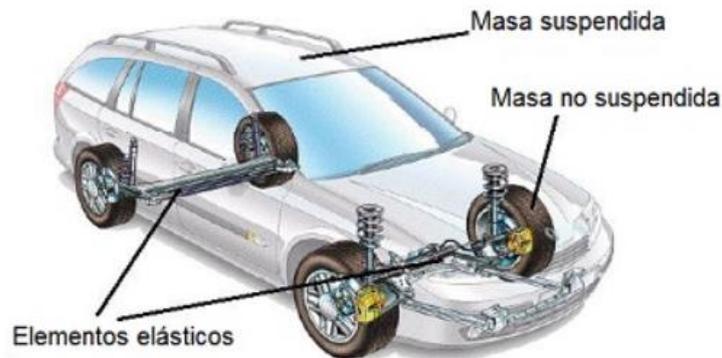


ILUSTRACIÓN 3.20 – TIPOS DE MASAS EN UN VEHÍCULO [35]

Desde un punto de vista geométrico, la rueda como cualquier cuerpo que se mueve en el espacio, lo hace sobre sus tres ejes lineales, sobre los que además puede rotar, dando lugar a un movimiento de hasta seis grados de libertad. Para entender con mayor detalle los variados sistemas que existen de suspensión, se explicarán a continuación una serie de ángulos que afectan al comportamiento de esa suspensión o ruedas:

- **Ángulo de caída (camber):** Es el ángulo formado por el eje vertical de las ruedas utilizadas para la dirección y el eje vertical del vehículo visto desde el frente o la parte trasera. Este ángulo puede ser positivo o negativo:

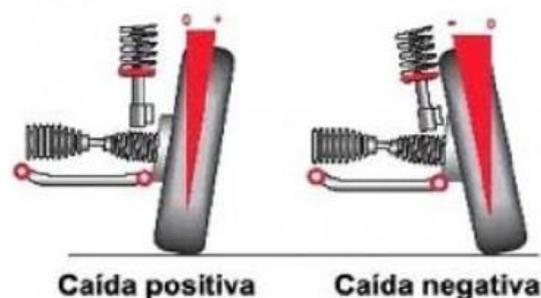


ILUSTRACIÓN 3.21 – ÁNGULO DE CAÍDA [34]

Se suele usar caída negativa para mejorar el agarre en curvas y por tanto la estabilidad. Para maximizar la aceleración en línea recta, se usa ángulo de caída 0 y el ángulo de caída positivo se suele usar en vehículos agrícolas para conseguir una dirección más ligera.

- **Ángulo de convergencia/divergencia (toe):** Identifica la dirección hacia la cual apuntan las ruedas comparándolas con la dirección longitudinal del vehículo. La convergencia se da cuando las ruedas están orientadas hacia el interior del vehículo y divergencia cuando apuntan hacia el exterior.

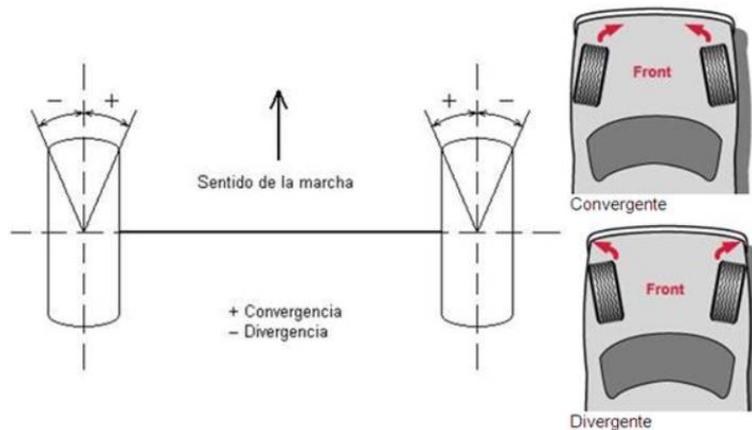


ILUSTRACIÓN 3.22 – ÁNGULO DE CONVERGENCIA/DIVERGENCIA [34]

La convergencia generalmente ayuda a tener mayor estabilidad en el vehículo.

- **Ángulo de avance (caster):** Es el ángulo formado por la prolongación del eje del pivote con el eje vertical que pasa por el centro de la rueda en su dirección de avance.

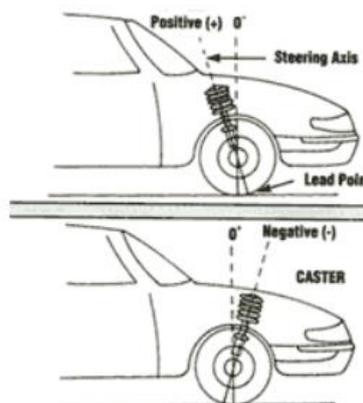


ILUSTRACIÓN 3.23 – ÁNGULO DE AVANCE [38]

Este ángulo es positivo cuando la parte de arriba de la línea se inclina hacia la parte trasera del vehículo y negativo cuando se inclina al frente. El ángulo de avance positivo aumentará el esfuerzo de dirección y continuar en línea recta a la vez que mejora la estabilidad al conducir a velocidades elevadas y la efectividad al girar en curvas.



A parte de ese punto de vista geométrico, también existen varias clasificaciones de suspensiones diferentes puesto que se han desarrollado bastantes sistemas a lo largo de los últimos años. La clasificación más general que podemos hacer es diferenciar entre suspensiones independientes y dependientes:

- **Suspensión dependiente:** Sistema de suspensión de un automóvil en el que las ruedas de un mismo eje se encuentran sólidamente unidas entre sí mediante un eje rígido, de modo que tanto el desplazamiento vertical como el transversal de una sola rueda afecta al resto de las ruedas del eje. Existen dos ejemplos más típicos de este tipo de suspensión como son el eje rígido y el puente deformable.
- **Suspensión independiente:** Se refiere a cualquier sistema de suspensión de automóvil que permita el desplazamiento vertical de una rueda sin afectar al resto de las ruedas de su eje. Los ejemplos más comunes de este tipo de suspensión son: Doble trapecio, McPherson, multibrazo y brazo tirado.

Tradicionalmente los sistemas de suspensión dependiente han sido más robustos y económicos de diseño y fabricación. En la actualidad sin embargo el abaratamiento de los sistemas de suspensión independiente y de la mecanización de los componentes necesarios para dotarlos de sistemas de transmisión como son las juntas cardán, homocinéticas, manguetas, etc., han hecho desaparecer esa ventaja económica y han abarcado casi todos los terrenos de la automoción, empleándose las suspensiones dependientes en vehículos de bajo coste o industriales básicamente.

La principal ventaja de las suspensiones independientes desde el punto de vista de dinámica de vehículos es que por un lado permiten que cada rueda trabaje sin verse afectada por el desplazamiento de las demás y por otro reducen drásticamente la masa no suspendida, características que hacen mejorar el confort para los ocupantes y un mejor comportamiento para el vehículo.

En el caso de las suspensiones dependientes, su ventaja es que son capaces de mantener invariable su geometría. Cuando un vehículo toma una curva, la aceleración centrípeta someterá a las ruedas exteriores a dos fuerzas simultáneas, una fuerza de compresión debida a la inclinación de la carrocería y una fuerza lateral que empuja la parte inferior de las ruedas exteriores hacia el interior de la curva. Estas suspensiones consiguen mantener las ruedas paralelas a la carretera en todo momento pese a la interacción de ambas fuerzas de modo natural.

En cualquier caso, tanto en suspensiones dependientes como independientes es habitual conectar de forma indirecta las ruedas de un mismo eje con barras estabilizadoras, mecanismos capaces de limitar la inclinación de la carrocería mediante la transmisión a las ruedas interiores de parte de la fuerza de compresión ejercida por la fuerza centrífuga sobre las exteriores.

En nuestro vehículo RBK, como ya se dijo anteriormente, tendremos dos sistemas de suspensión totalmente distintos en la parte frontal y en la parte trasera que se verán a continuación:

3.3.5.1 Suspensión Frontal

En nuestro vehículo RBK, este tipo de suspensión se basa simplemente en un amortiguador convencional y una ballesta transversal como ya se vio en la ilustración 3.4. Para realizar nuestro modelado, se cogerá el subsistema llamado *pickup_truck_front_SLA_torsional* y trabajaremos con él, modificando los hardpoints y elementos necesarios para ajustarlo lo máximo posible a nuestro vehículo.

La tabla de los hardpoints queda como se ve a continuación:

Hardpoint Modification Table

Assembly		Subsystem		
.Susp_front_SLA_torsional_RBK				
	loc_x	loc_y	loc_z	
hpl_bar_to_subframe	700.0	-190.0	120.0	
hpl_lca_front	150.0	-190.0	110.0	
hpl_lca_outer	267.0	-400.0	80.0	
hpl_lca_rear	467.0	-190.0	115.0	
hpl_lwr_strut_mount	310.0	-300.0	100.0	
hpl_subframe_front	-133.0	-190.0	100.0	
hpl_tierod_inner	467.0	-280.0	230.0	
hpl_tierod_outer	417.0	-460.0	230.0	
hpl_top_mount	325.0	-240.0	460.0	
hpl_uca_front	167.0	-190.0	400.0	
hpl_uca_outer	307.0	-415.0	390.0	
hpl_uca_rear	517.0	-230.0	390.0	
hpl_wheel_center	267.0	-600.0	210.0	

ILUSTRACIÓN 3.24 - HARDPOINTS SUSPENSIÓN FRONTAL

Una vez realizado el modelado, el subsistema de suspensión frontal de multibrazo se guardará con el nombre de *Susp_front_SLA_torsional_RBK* y quedará como se ve a continuación:

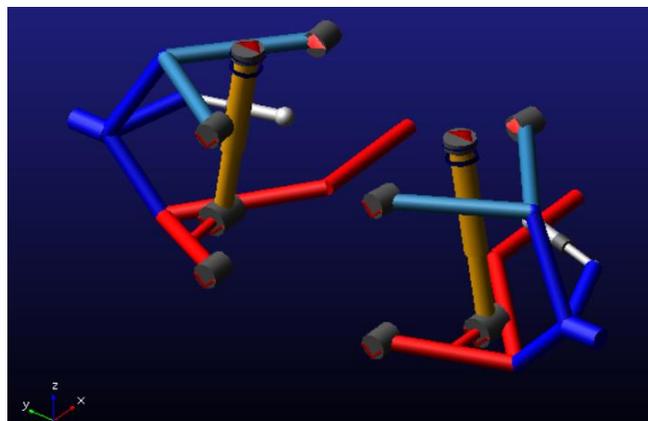


ILUSTRACIÓN 3.25 – SUBSISTEMA SUSPENSIÓN FRONTAL MULTIBRAZO EN ADAMS CAR

3.3.5.2 Suspensión Trasera

Para la suspensión trasera, se modelará tal cual ya que el vehículo a modelar lleva dos ballestas y en el programa Adams Car tenemos un subsistema de ballesta. Se puede ver este tipo de ballestas traseras que posee el vehículo en la ilustración 3.3 que se vio en un capítulo anterior.

La tabla de hardpoints para esta suspensión será la siguiente:

Hardpoint Modification Table

Assembly		.solid_axle_rear_RBK		
	loc_x	loc_y	loc_z	
hpl_hub_loc	1925.9	-550.0	210.0	
hpl_hub_to_axle	1925.9	-550.0	210.0	
hpl_inside_whl_cntr	1925.9	-600.0	210.0	
hpl_outside_whl_cntr	1925.9	-890.0	210.0	
hpl_shock_to_axle	2030.0	-450.0	90.0	
hpl_shock_to_frame	2090.0	-400.0	380.0	
hpl_spring_seat	1925.9	-373.9	234.9	
hps_center_of_drive_axles	1925.9	0.0	210.0	
hps_origin	-3180.0	0.0	-350.0	

ILUSTRACIÓN 3.26 - HARDPOINTS SUSPENSIÓN TRASERA

Una vez realizado el modelado en el programa Adams Car, el ensamblaje de la suspensión trasera con las ballestas quedará como se ve a continuación:

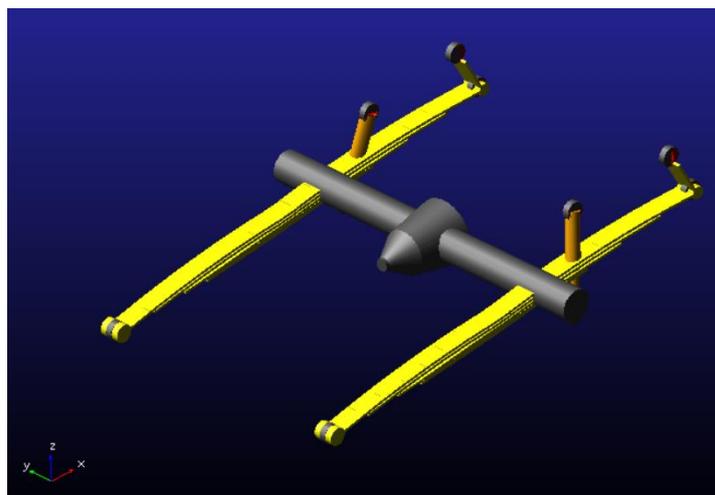


ILUSTRACIÓN 3.27 – ENSAMBLAJE SUSPENSIÓN TRASERA EN ADAMS CAR

3.3.6 Sistema de dirección

El sistema de dirección de un vehículo es el conjunto de componentes que hacen posible a cualquier vehículo variar su trayectoria para seguir el camino deseado. Para conseguir este objetivo, en general, los sistemas de dirección utilizan las ruedas del vehículo principalmente junto con una serie de partes como puede ser el volante y el engranaje de la dirección entre otros. Esas ruedas, bien se modifica su orientación como en un automóvil, disminuyendo su perímetro de su circunferencia como puede ser en una motocicleta al inclinarse o mediante el giro diferencial como en una silla de ruedas o en un vehículo oruga. También tenemos el caso del ferrocarril en el que la dirección es controlada mediante raíles.

Hay diferentes tipos de sistemas de dirección, pero uno de los más importantes es la dirección de Ackermann, la cual resolvió el problema de giro de las ruedas en las curvas donde cada rueda necesitaba tener un giro con radio distinto debido a la anchura del eje que separaba cada rueda delantera.

A continuación, se verá un esquema de un sistema de dirección tipo Ackerman:

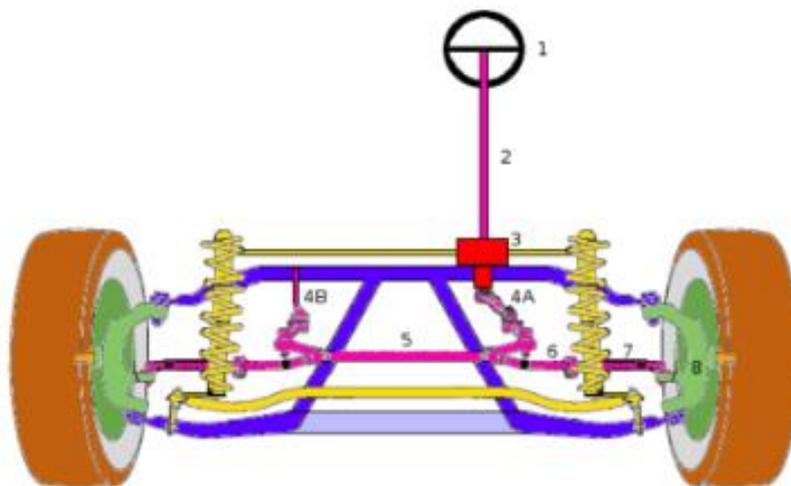


ILUSTRACIÓN 3.28 – SISTEMA DE DIRECCIÓN [42]

- 1- Volante
- 2- Columna de dirección
- 3- Engranaje de dirección
- 4A- Brazo de mando
- 4B- Brazo tensor
- 5- Tirante central
- 6- Tirante interno
- 7- Mangueta de ajuste
- 8- Brazo de los tirantes

Para realizar nuestro modelado en el programa Adams Car, se cogerá el subsistema llamado *parallel_link_steering* y se trabajará con él modificando lo necesario para adaptarlo a nuestro modelo real. La tabla de hardpoints queda como se ve a continuación:

Assembly		Subsystem		
.Direccion_RBK				
	loc_x	loc_y	loc_z	
hpl_arm_forward	525.0	-200.0	230.0	
hpl_arm_rearward	625.0	-300.0	230.0	
hpl_arm_upper	625.0	-325.0	430.0	
hpl_tierod_inner	467.0	-280.0	230.0	
hps_input_shaft_forward	600.0	-300.0	430.0	
hps_intermediate_shaft_forward	700.0	-300.0	530.0	
hps_intermediate_shaft_rearward	850.0	-400.0	930.0	
hps_steering_wheel_center	1150.0	-400.0	1000.0	

ILUSTRACIÓN 3.29 - HARDPOINTS DIRECCIÓN

Una vez realizado el modelado en Adams Car, el sistema de la dirección se guardará con el nombre de *Direccion_RBK* y quedará de la siguiente forma:

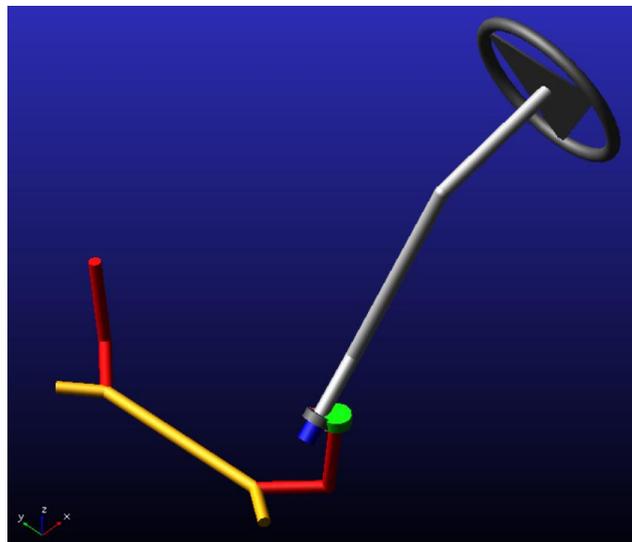


ILUSTRACIÓN 3.30 – SUBSISTEMA DE DIRECCIÓN EN ADAMS CAR

3.3.7 Driveline

Este elemento es el encargado de transmitir la potencia desde el motor hasta las ruedas para hacerlas girar. Es fundamental tener el palier en buen estado ya que es una de las piezas más importantes de un vehículo que permite que tanto la suspensión como las ruedas trabajen adecuadamente.

Assembly		Subsystem		
.Driveline_rwd_RBK				
	loc_x	loc_y	loc_z	
hpl_diff_output	1925.9	-150.0	208.4	
hps_diff_mount	800.0	0.0	0.0	
hps_propshaft_intermediate	1500.0	0.0	450.0	
hps_rear_diff_input	1720.0	0.0	200.0	

ILUSTRACIÓN 3.31 - HARDPOINTS DRIVELINE

Una vez realizado el modelado en ADAMS Car, el sistema de driveline se guardará con el nombre de *Driveline_rwd_RBK* y quedará de la siguiente forma:

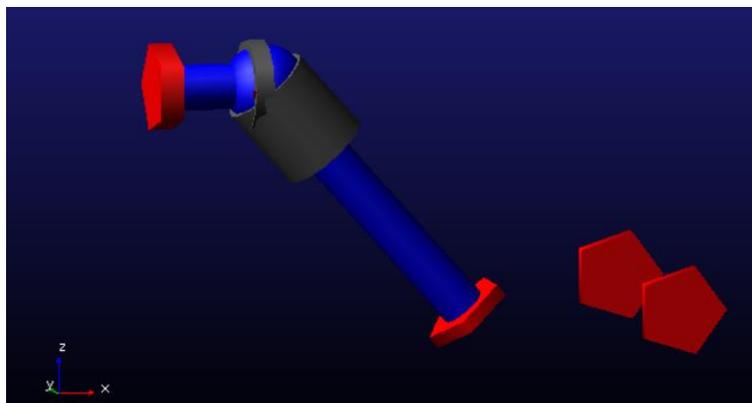


ILUSTRACIÓN 3.32 – SUBSISTEMA DRIVELINE EN ADAMS CAR

3.3.8 Ensamblado completo del vehículo RBK

En este apartado se procederá a realizar el ensamblado completo del vehículo RBK, es decir, se unirán todos los subsistemas creados anteriormente para poder realizar las diferentes simulaciones posteriores como un vehículo completo.

Para crear dicho ensamblaje, se procederá de la siguiente forma: En la barra de herramientas, se seleccionará la opción “File” y dentro de ella, se elegirá la opción para crear un nuevo ensamblaje de un vehículo completo. A continuación, se abrirá una ventana donde se indican los subsistemas necesarios a incorporar para realizar dicho ensamblado. En nuestro caso, esos subsistemas serán todos los mencionados anteriormente, tal y como se puede observar en la siguiente imagen:

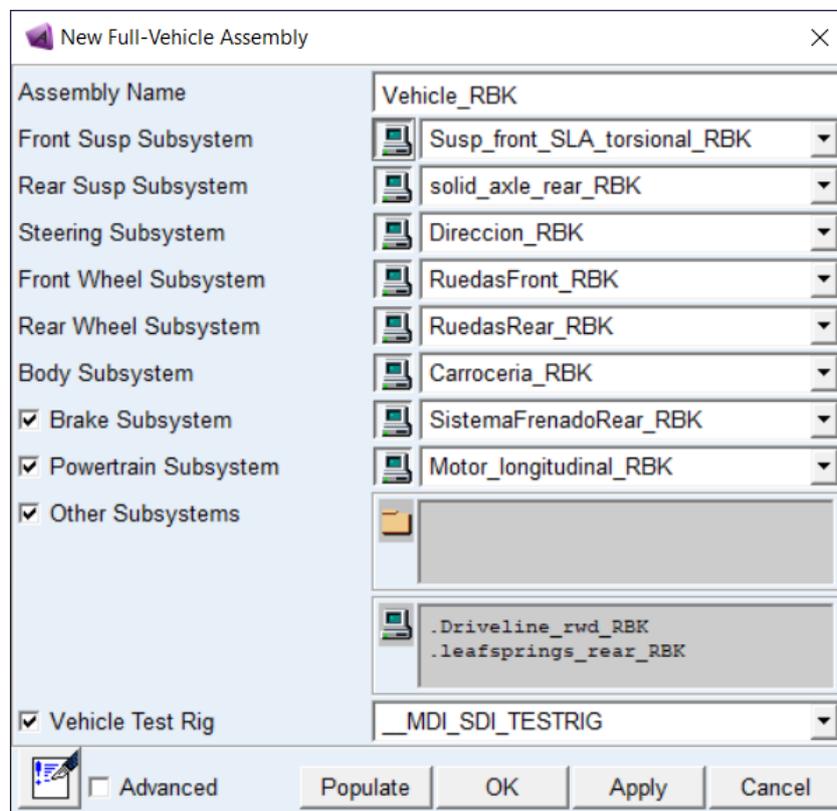


ILUSTRACIÓN 3.33 - NUEVO ENSAMBLAJE DEL VEHÍCULO COMPLETO RBK EN ADAMS CAR

Una vez creado el nuevo ensamblaje de nuestro vehículo completo con el nombre de “*Vehicle_RBK*” y los subsistemas correspondientes, el resultado es el que se ve a continuación:

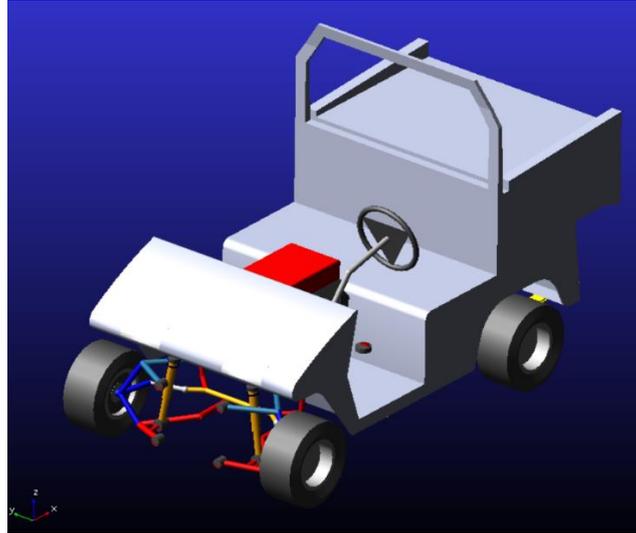


ILUSTRACIÓN 3.34 – VEHÍCULO RBK COMPLETO EN ADAMS CARS

Para un mejor posicionamiento de todos los componentes, se han tenido que modificar algunos hardpoints de los subsistemas y aunque se ve el motor atravesando la carrocería, este no influirá a la hora de realizar las simulaciones.

Para poder ver mejor la disposición de todos los subsistemas, se seleccionará la vista de estructura metálica que viene en la interfaz del programa ADAMS Car de tal forma que nuestro vehículo en cuestión queda de la siguiente manera:

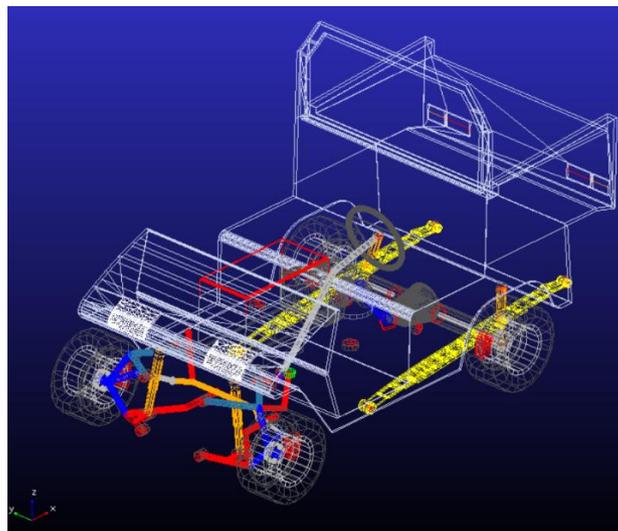


ILUSTRACIÓN 3.35 - ESTRUCTURA METÁLICA DEL VEHÍCULO RBK EN ADAMS CARS

Si se observa desde el lateral, se puede ver todos los subsistemas unidos, ordenados y diferenciados unos de otros:

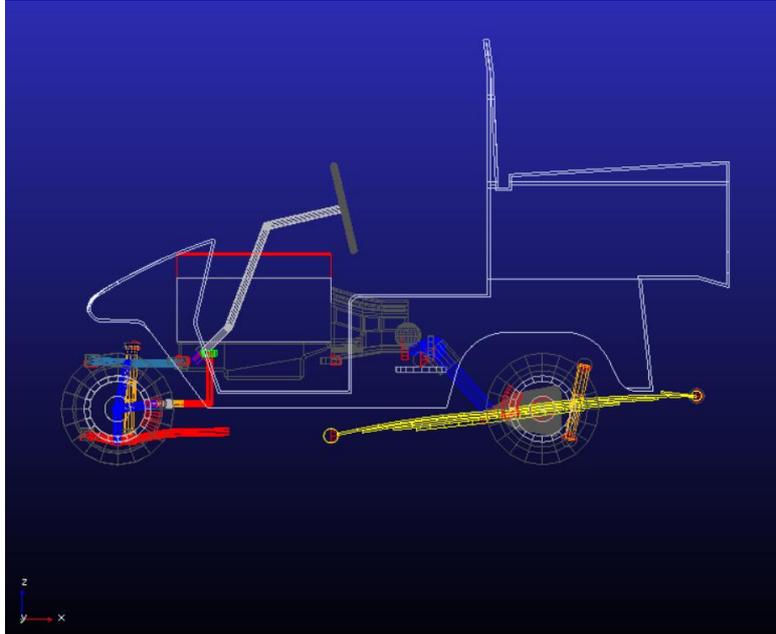


ILUSTRACIÓN 3.36 – VEHÍCULO RBK VISTA LATERAL EN ADAMS CAR

En la imagen anterior se puede diferenciar perfectamente tanto la suspensión delantera de multibrazo como la suspensión trasera de ballestas. Además, también se puede observar cómo está unida la dirección a la suspensión delantera y como está unido el motor a la transmisión trasera mediante el driveline. Por último, también se distingue el sistema de frenado adjunto a las ruedas.

4.- SIMULACIÓN DEL VEHÍCULO RBK

Una vez que tenemos el vehículo RBK totalmente ensamblado, se procederá a realizar las respectivas simulaciones dinámicas con el programa ADAMS Car:

4.1 Aceleración

El primer análisis que realizaremos a nuestro vehículo consistirá en una prueba de aceleración. Para ello, se simulará nuestro vehículo por una recta en la cual circula con una velocidad inicial de 5 km/h hasta el primer segundo que será cuando se accione el acelerador a fondo, hasta el 100%, y se mantendrá pulsado hasta los 10s que durará dicha prueba.

Se introducirán dichas condiciones en el programa ADAMS Car como se ve en la siguiente imagen:

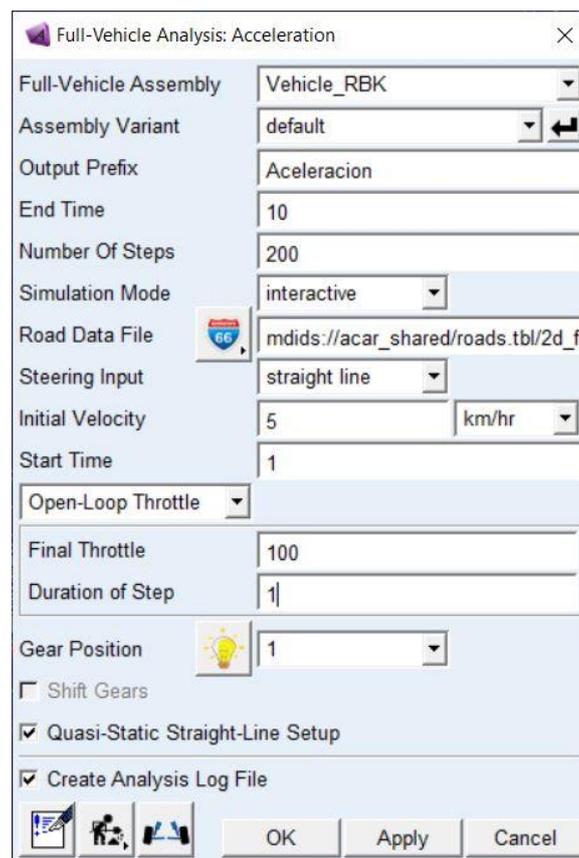
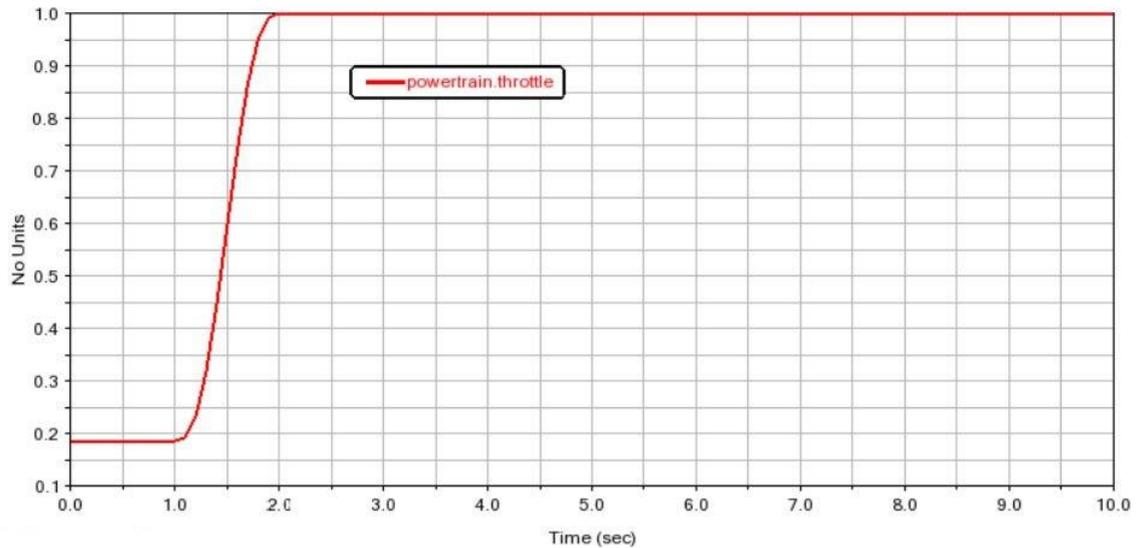
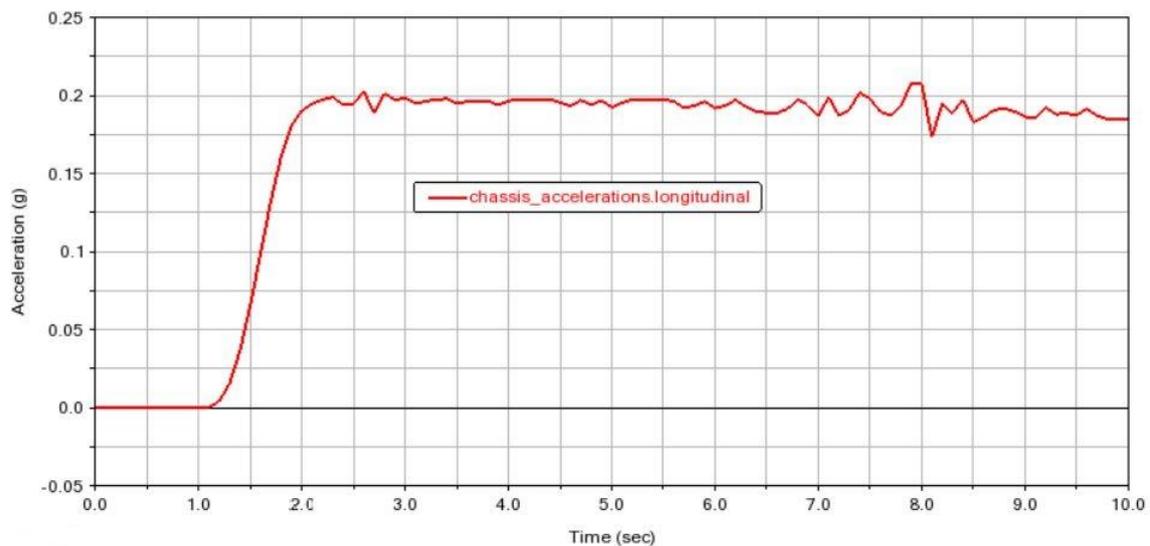


ILUSTRACIÓN 4.1 - CONDICIONES PRUEBA DE ACELERACIÓN

Una vez realizada la simulación, se procederá a analizar los resultados obtenidos en las gráficas que se mostrarán a continuación:

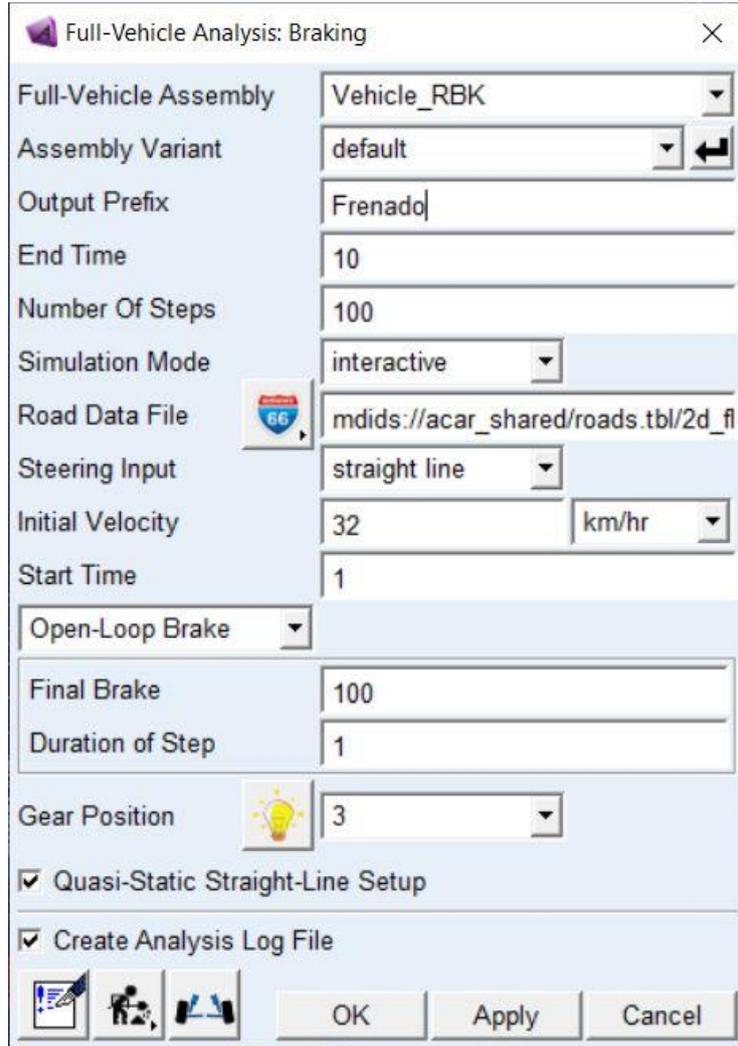
**ILUSTRACIÓN 4.2 –ACELERADOR EN LA PRUEBA DE ACELERACIÓN****ILUSTRACIÓN 4.3 - ACELERACIÓN DEL VEHÍCULO RBK EN LA PRUEBA DE ACELERACIÓN**

En estas dos gráficas mostradas anteriormente, se puede observar cómo se realiza el estímulo de la aceleración al segundo 1 de iniciar la prueba, pasando de pulsar el acelerador del 0 al 100% en milésimas de segundo y manteniéndolo pulsado durante el resto de la prueba. La aceleración llega a un valor máximo de 0.2g (1.962 m/s^2), produciéndose también ligeras variaciones sin importancia durante la prueba.

4.2 Frenado

En esta prueba se hará lo contrario a la anterior, tendremos a nuestro vehículo circulando con una velocidad inicial de 32 km/h y al segundo 1 de empezar, se activará el freno hasta pulsarlo al 100 %.

Las condiciones que introduciremos en el programa serán las siguientes:



Parameter	Value
Full-Vehicle Assembly	Vehicle_RBK
Assembly Variant	default
Output Prefix	Frenado
End Time	10
Number Of Steps	100
Simulation Mode	interactive
Road Data File	mdids://acar_shared/roads.tbl/2d_fl
Steering Input	straight line
Initial Velocity	32 km/hr
Start Time	1
Open-Loop Brake	Open-Loop Brake
Final Brake	100
Duration of Step	1
Gear Position	3
Quasi-Static Straight-Line Setup	<input checked="" type="checkbox"/>
Create Analysis Log File	<input checked="" type="checkbox"/>

ILUSTRACIÓN 4.4 - CONDICIONES PRUEBA DE FRENADO

De la misma forma que en el caso anterior, se realizará la simulación y se sacarán las gráficas más características para analizar los resultados obtenidos.

La primera gráfica para comentar será la activación del freno. Como se dijo anteriormente, se iniciará después de un segundo al iniciar la prueba y tardará aproximadamente 1 s hasta su activación completa. A continuación, vemos como se produce ese estímulo:



ILUSTRACIÓN 4.5 - ACTIVACIÓN DEL FRENO EN LA PRUEBA DE FRENADO

En la siguiente gráfica, se observa la aceleración longitudinal producida en el vehículo al activar el freno completamente, llegando a un pico de $-0.425g$ y manteniéndose en $-0.31g$ (-3.041 m/s^2) aproximadamente.

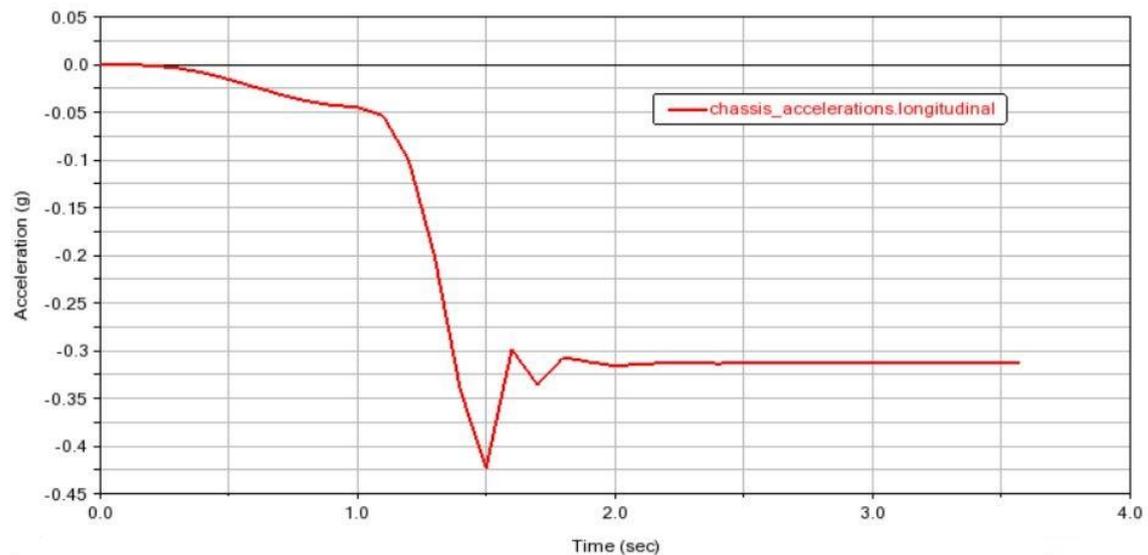


ILUSTRACIÓN 4.6 - ACELERACIÓN LONGITUDINAL EN LA PRUEBA DE FRENADO

A continuación, se verá como desciende la velocidad del vehículo RBK:

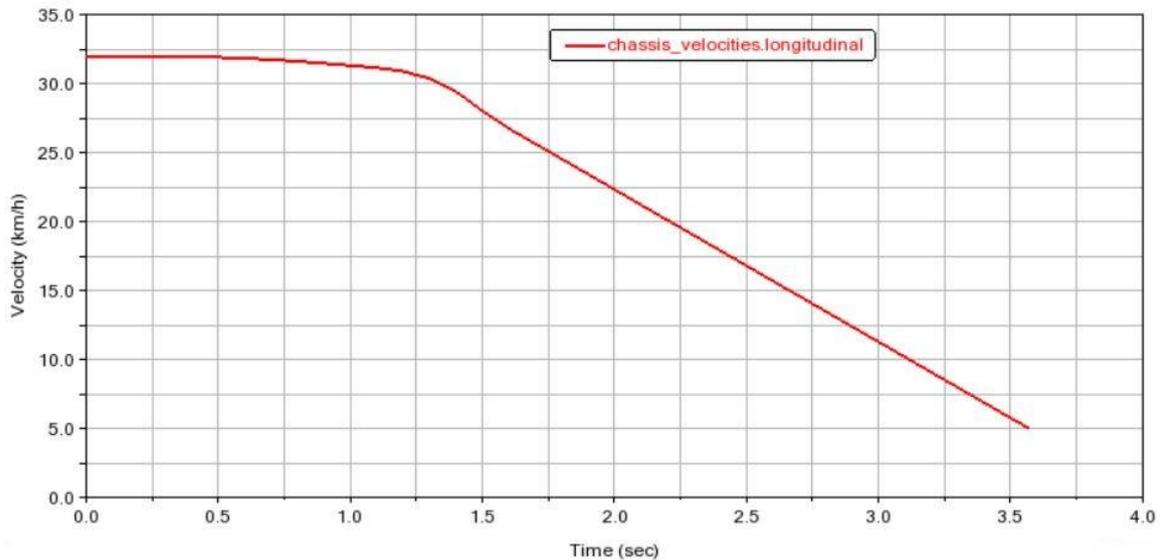


ILUSTRACIÓN 4.7 - VELOCIDAD LONGITUDINAL EN LA PRUEBA DE FRENADO

El vehículo en cuestión inicia la prueba con una velocidad de 32 km/h que comenzará a disminuir, llegando a una velocidad final de 5 km/h en unos dos segundos y medio aproximadamente después de activarse el freno.

Por último, analizaremos la distancia recorrida durante el frenado:

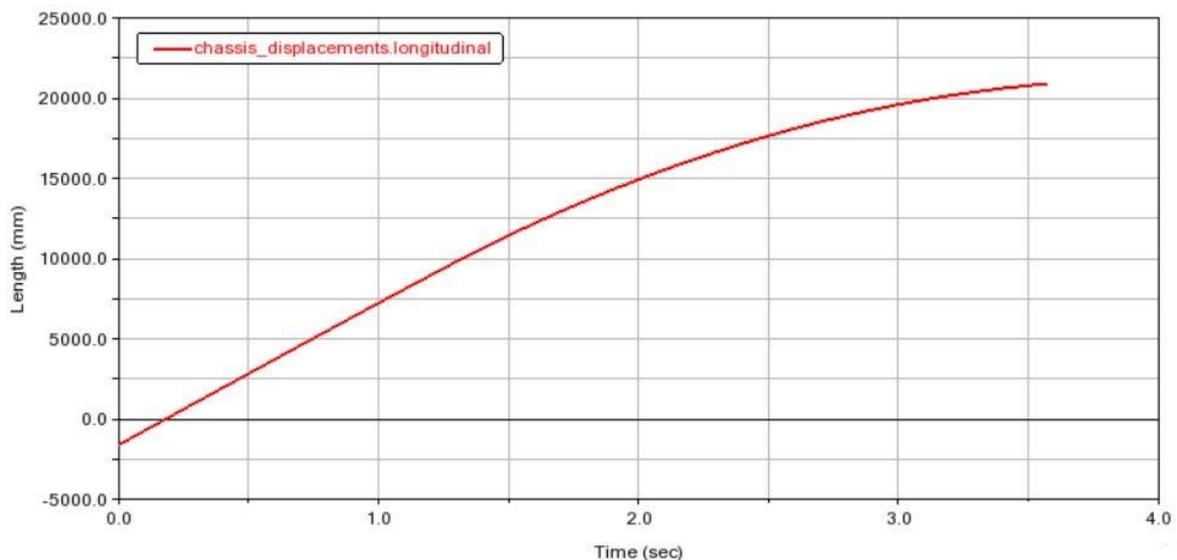


ILUSTRACIÓN 4.8 – DISTANCIA RECORRIDA DEL VEHÍCULO RBK EN LA PRUEBA DE FRENADO

Durante el tiempo de frenado, el vehículo llega a recorrer un poco más de 13 m antes de pararse por completo ya que contabilizamos desde el segundo 1 que es cuando se acciona el freno.

4.3 Paso por curva (PPC)

Una vez visto las pruebas de aceleración y frenado, otra prueba importante será analizar el paso por curva de nuestro vehículo RBK y analizar las fuerzas que se puedan ejercer en las ruedas.

Para llevar a cabo esta prueba, se seleccionará la opción “*Constant Radius Cornering*”, otra de las simulaciones disponibles que nos ofrece el programa ADAMS Car para un vehículo completo. Lo que se hará esta prueba será simular el vehículo en cuestión circulando por una curva, con giro a izquierdas, con un radio de 25 m, con una velocidad inicial de 7 km/h y una velocidad final máxima de 32 km/h. La duración de la prueba será de 30 s. A continuación, se verá como introducimos esas condiciones en el programa:

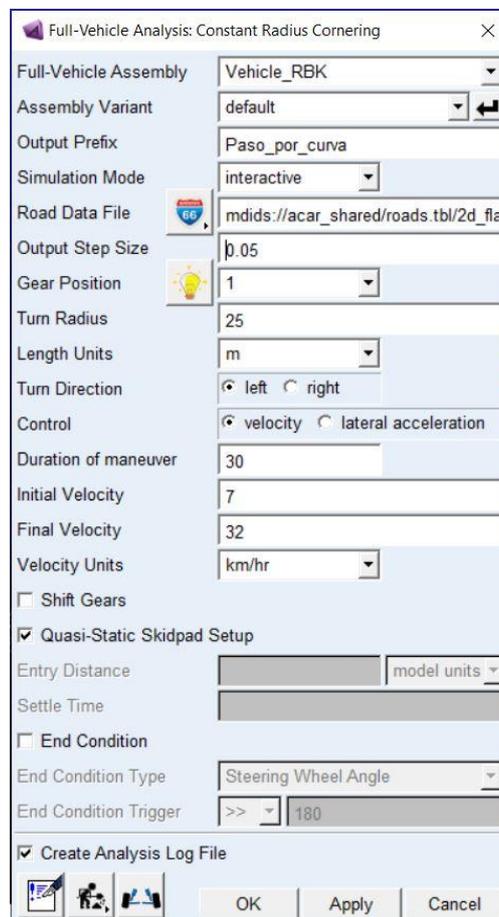


ILUSTRACIÓN 4.9 - CONDICIONES PRUEBA PASO POR CURVA

El primer resultado que se mostrará será la velocidad que alcanza el vehículo durante la prueba. Este inicia a 7 km/h como se había impuesto y durante el transcurso de los 30s que dura la prueba, llega a alcanzar una velocidad final de 32 km/h aproximadamente, se puede ver en la siguiente imagen:

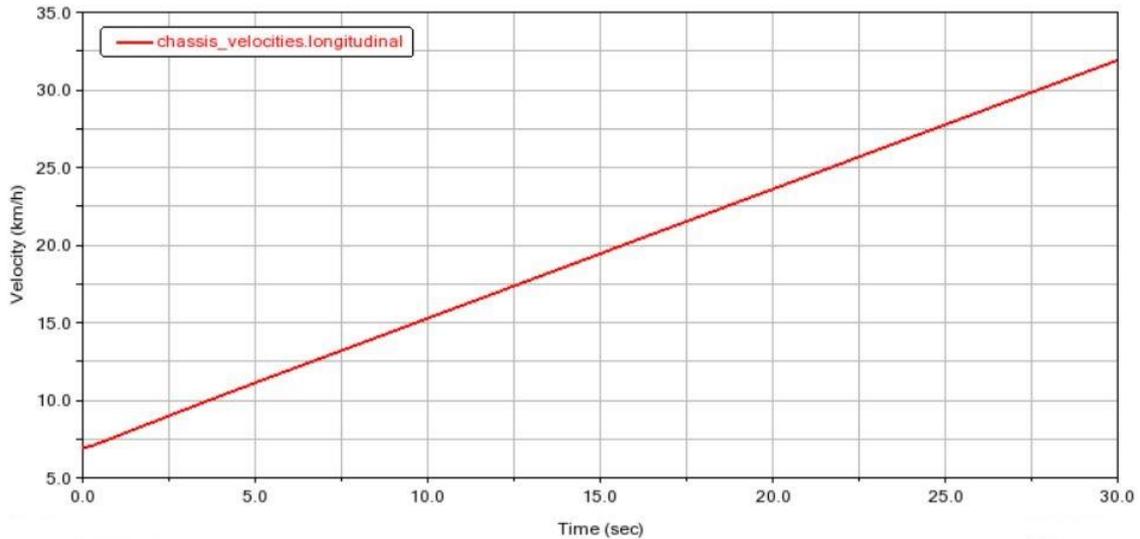


ILUSTRACIÓN 4.10 – VELOCIDAD LONGITUDINAL EN LA PRUEBA PASO POR CURVA

El vehículo RBK durante el giro de la curva, recorre un ángulo de guiñada de poco más de 360° , por lo que da una vuelta completa desde su posición inicial, como se puede ver a continuación:

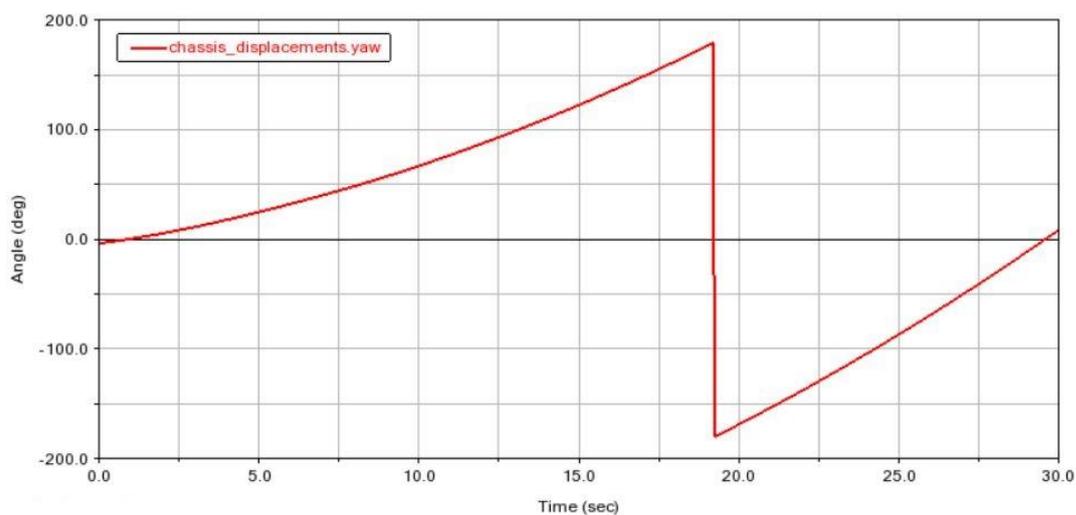


ILUSTRACIÓN 4.11 – VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE GUIÑADA PRUEBA PASO POR CURVA

Ahora se analizarán las fuerzas producidas en las ruedas durante la prueba. La primera que analizaremos será la fuerza longitudinal tanto en las ruedas delanteras como en las traseras:

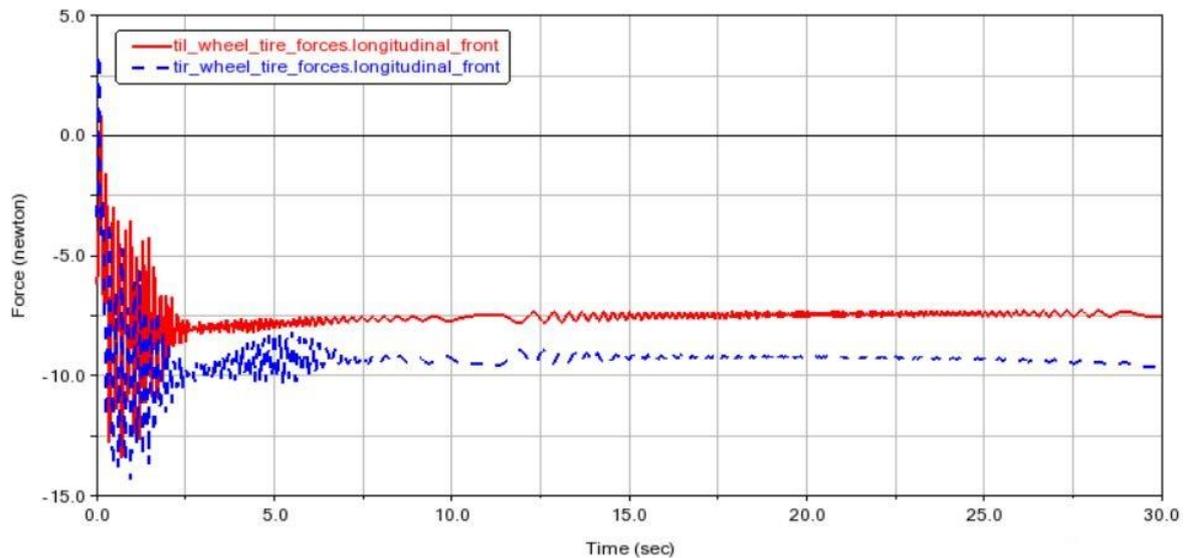


ILUSTRACIÓN 4.12 - FUERZA LONGITUDINAL DELANTERA (PPC)

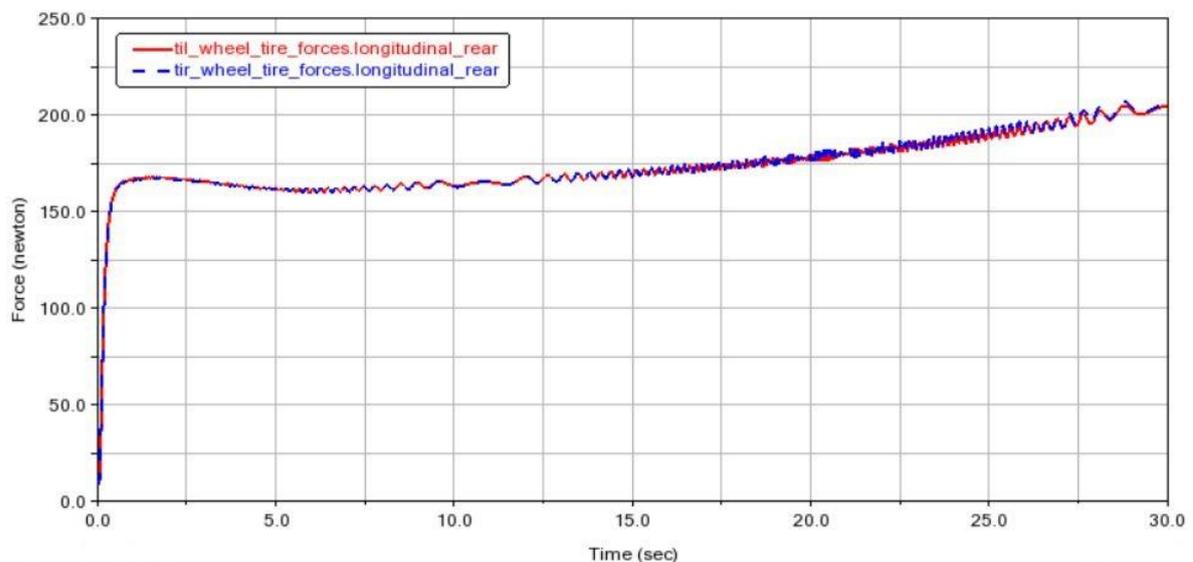


ILUSTRACIÓN 4.13 - FUERZA LONGITUDINAL TRASERA (PPC)

Las fuerzas longitudinales delanteras se mantienen constantes a lo largo del trayecto, aunque tienen un valor muy pequeño, de 7,5 N en la rueda izquierda y de 9 N en la rueda derecha aproximadamente, prácticamente nulas, se producen por la rodadura con el terreno. Las fuerzas longitudinales traseras son iguales en las dos ruedas, comienzan en un valor de unos 165 N y van aumentando ligeramente con el aumento de la velocidad, debido a la aceleración y tracción trasera del vehículo.

A continuación, se verán las fuerzas laterales que se generan en las ruedas delanteras y traseras del vehículo en cuestión:

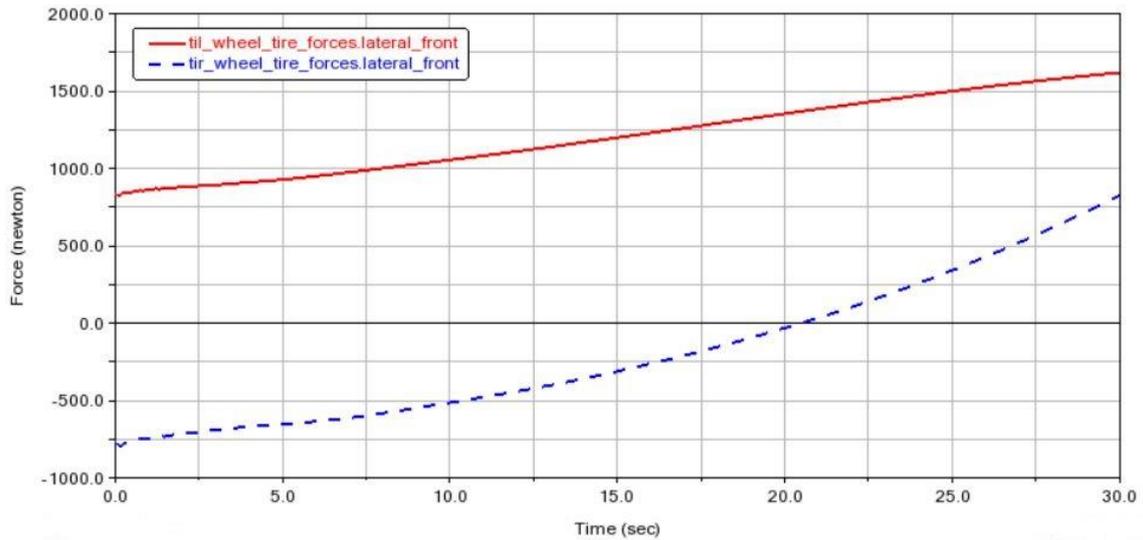


ILUSTRACIÓN 4.14 - FUERZA LATERAL DELANTERA (PPC)

Las fuerzas laterales de las ruedas delanteras empiezan en el mismo valor, 825 N, pero de signo contrario en cada rueda por el ángulo de estas. Las fuerzas van en el mismo sentido por el giro de la curva que es igual durante toda la maniobra, se va produciendo un aumento en la rueda izquierda y disminución en la rueda derecha hasta llegar a 0 e incrementarse ambas con signo positivo. En la rueda izquierda se llega a los 1625 N.

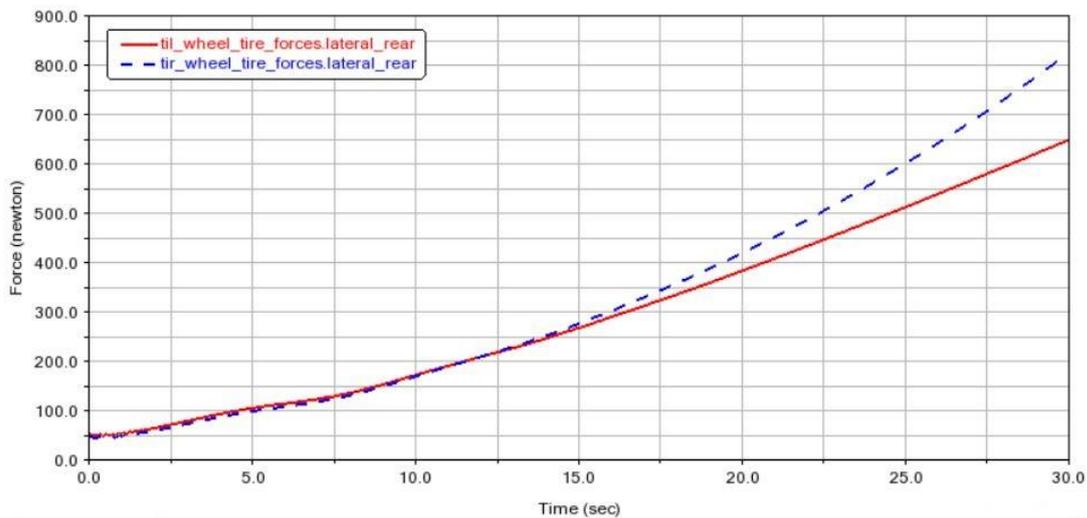


ILUSTRACIÓN 4.15 - FUERZA LATERAL TRASERA (PPC)

En las ruedas traseras, las fuerzas laterales van aumentando con el aumento de la velocidad y son prácticamente iguales durante los primeros 15 s hasta los 250 N. Después, en la rueda derecha se ejerce más fuerza que en la izquierda por el sentido de la curva.

Las fuerzas normales que afectan a las ruedas son las siguientes:

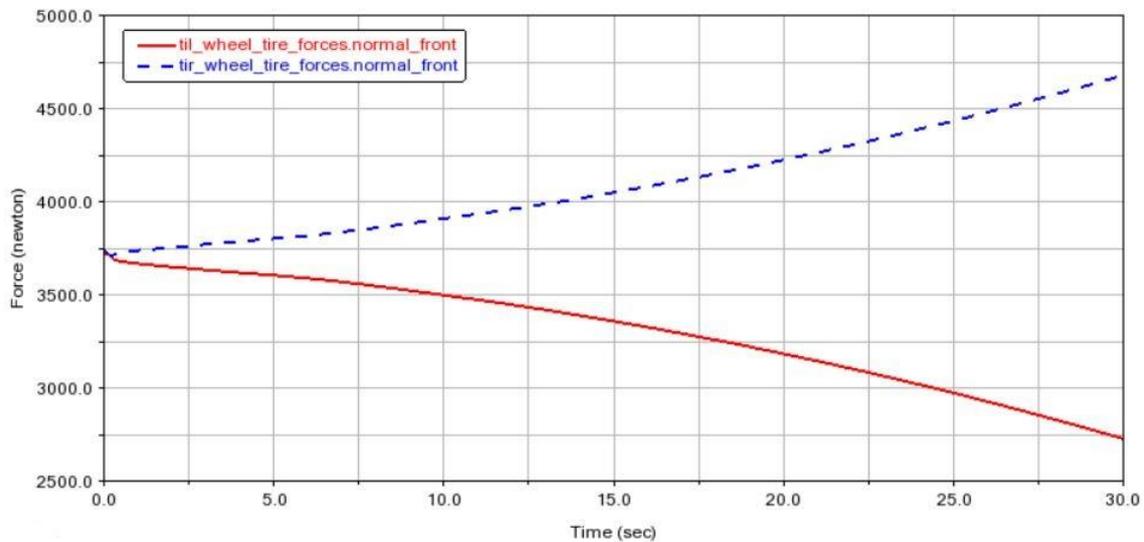


ILUSTRACIÓN 4.16 - FUERZA NORMAL DELANTERA (PPC)

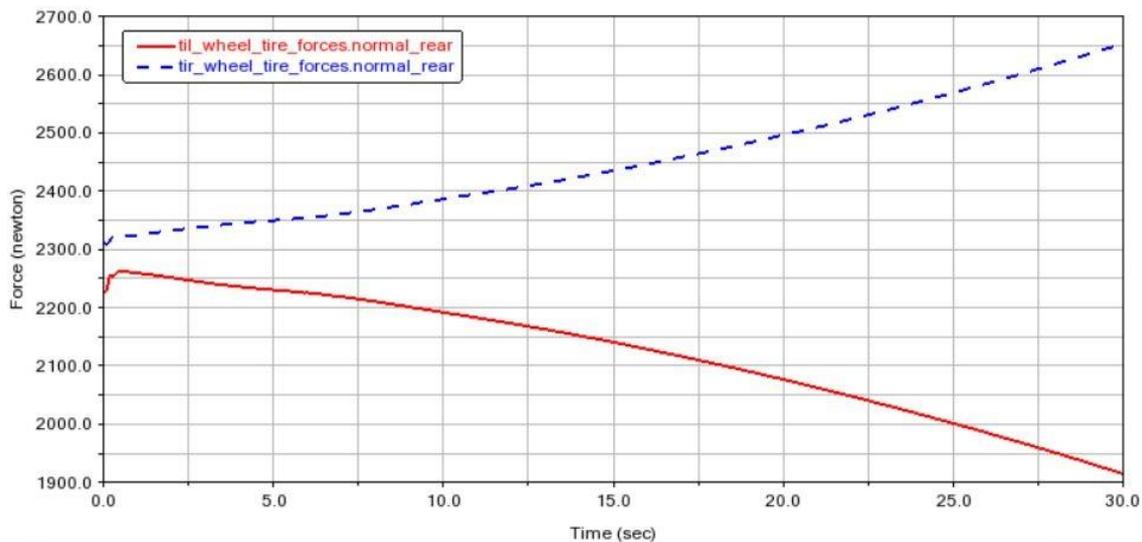


ILUSTRACIÓN 4.17 - FUERZA NORMAL TRASERA (PPC)

En las dos gráficas anteriores donde se tienen las fuerzas normales producidas en las ruedas durante el paso por curva, se puede observar que la rueda derecha e izquierda, ya sea delantera o trasera, se comportan de distinta forma. Esto se debe a que, al producirse el giro, el centro de masas varía y se desplaza hacia el lado exterior del vehículo en la curva. Al realizar el giro a izquierdas, el lado exterior del vehículo será el derecho por lo que el centro de masas se irá desplazando hacia esa zona y por tanto las fuerzas producidas se irán desplazando de la rueda izquierda a la derecha y será la que más peso tenga que soportar como se puede observar en las dos gráficas anteriores. El valor inicial en las ruedas delanteras es de 3750 N y en las traseras de 2275 N aproximadamente.

Por último, se verá la relación entre las fuerzas laterales y el ángulo de deriva de las ruedas y se caracterizará el comportamiento lateral de los neumáticos con un modelo de relación lineal. A continuación, se verá esa relación para cada rueda:

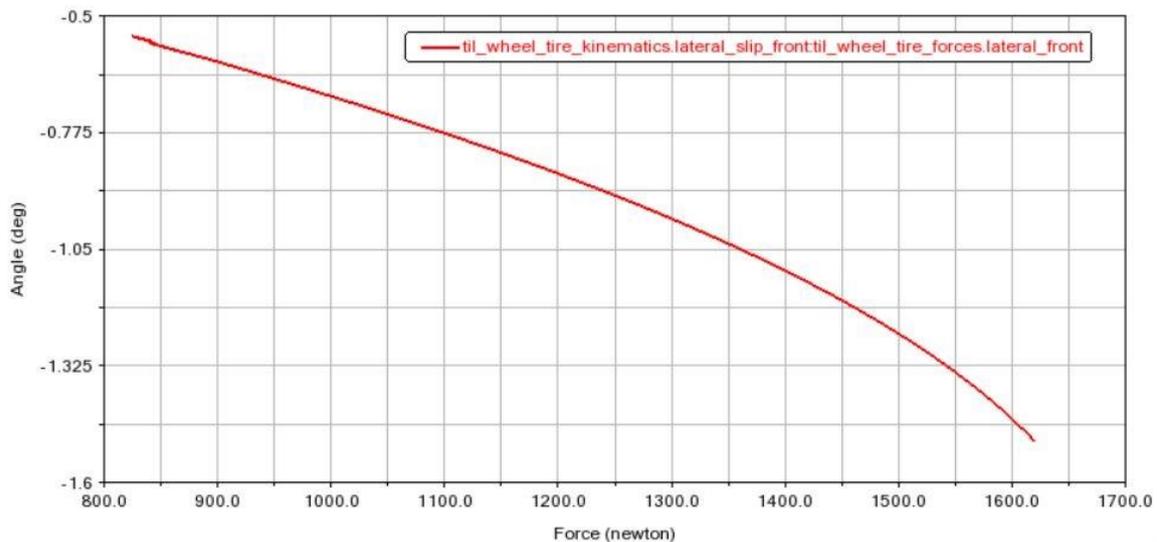


ILUSTRACIÓN 4.18 - ÁNGULO DE DERIVA VS FUERZA LATERAL RUEDA IZQ-DEL (PPC)

Se puede observar que dicha relación en la rueda izquierda delantera es lineal hasta que llega a un valor de 1450 N donde parece curvarse por lo que empezaría levemente a aparecer el fenómeno de la deriva en el que la rueda pasa a la zona de deslizamiento al variar bastante el ángulo de deriva con poco incremento de fuerza.

Para caracterizar esta rueda, se cogerán 10 puntos de esa gráfica y se calculará la constante (C) llamada rigidez lateral del neumático con la siguiente fórmula:

$$F_y = C \cdot \beta$$

Siendo F_y la fuerza lateral y β el ángulo de deriva expresado en radianes.

	F_y (N)	Ángulo deriva (β) (grados)	Ángulo deriva (β) (rad)
1	878	-0,591	-0,0103149
2	937	-0,6381	-0,0111369
3	972	-0,6668	-0,0116379
4	1017	-0,7039	-0,0122854
5	1061	-0,7419	-0,0129486
6	1098	-0,7749	-0,0135246
7	1150	-0,8233	-0,0143693
8	1205	-0,8768	-0,015303
9	1254	-0,9276	-0,0161897
10	1296	-0,9736	-0,0169925

Con la tabla anterior de puntos se podría sacar la siguiente gráfica con su línea de tendencia lineal donde se muestra esa constante en la pendiente:

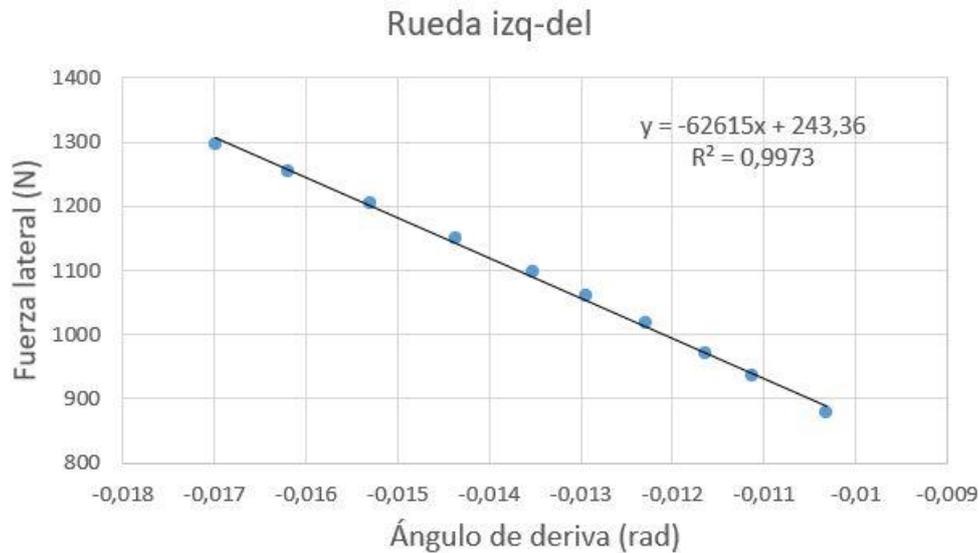


ILUSTRACIÓN 4.19 - AJUSTE LINEAL RUEDA IZQ-DEL

La siguiente gráfica será de la rueda derecha delantera:

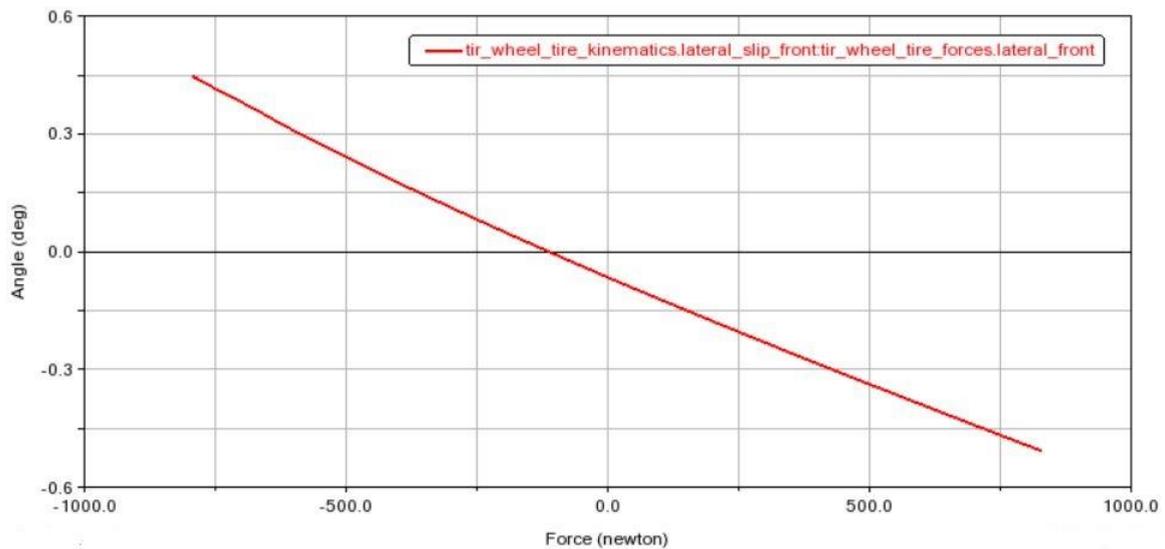


ILUSTRACIÓN 4.20 - ÁNGULO DE DERIVA VS FUERZA LATERAL RUEDA DER-DEL (PPC)

En esta otra gráfica, se observa que al igual que en la ilustración 4.14 donde se pasa de soportar fuerza negativa a positiva, en el ángulo de deriva también se genera un cambio de signo de positivo a negativo por las fuerzas laterales ejercidas en la rueda. En este caso se mantiene una relación lineal.



Para calcular la constante rigidez lateral del neumático derecho delantero se aplicará el mismo procedimiento que en el caso anterior, obteniendo los siguientes 10 puntos:

	F_y (N)	Ángulo deriva (β) (grados)	Ángulo deriva (β) (rad)
1	-712	0,3901	0,00680853
2	-622	0,3256	0,00568279
3	-518	0,2545	0,00444186
4	-426	0,1934	0,00337547
5	-331	0,1329	0,00231954
6	110	-0,1266	-0,0022096
7	227	-0,1912	-0,0033371
8	325	-0,2442	-0,0042621
9	522	-0,3485	-0,0060825
10	742	-0,4626	-0,0080739

La gráfica que se obtiene con los puntos anteriores y su línea de tendencia lineal con su pendiente se muestran a continuación:

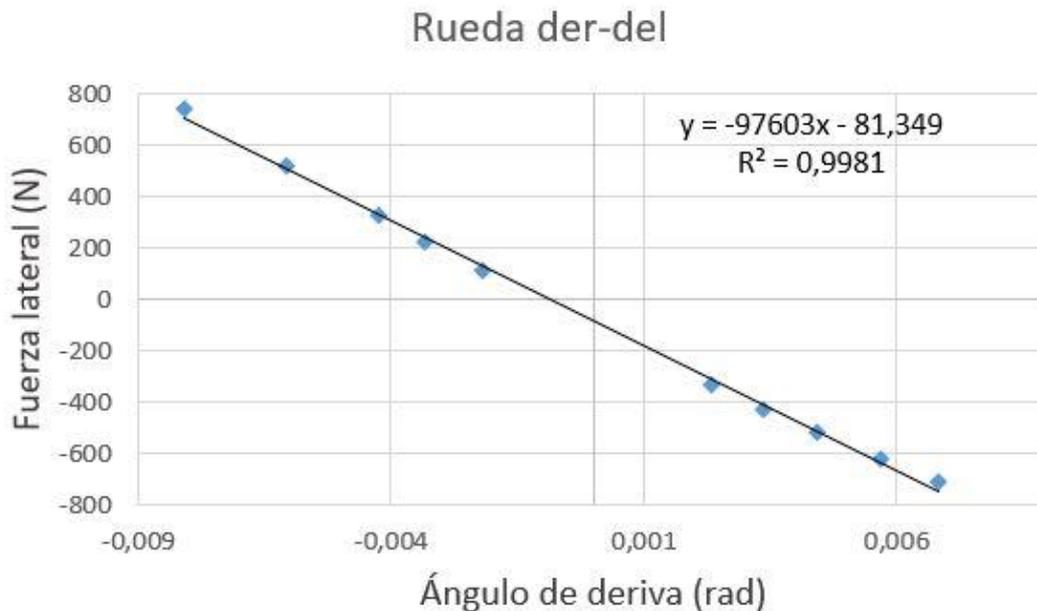


ILUSTRACIÓN 4.11 - AJUSTE LINEAL RUEDA DER-DEL

Ahora se verán las ruedas traseras, la primera será la rueda izquierda trasera:

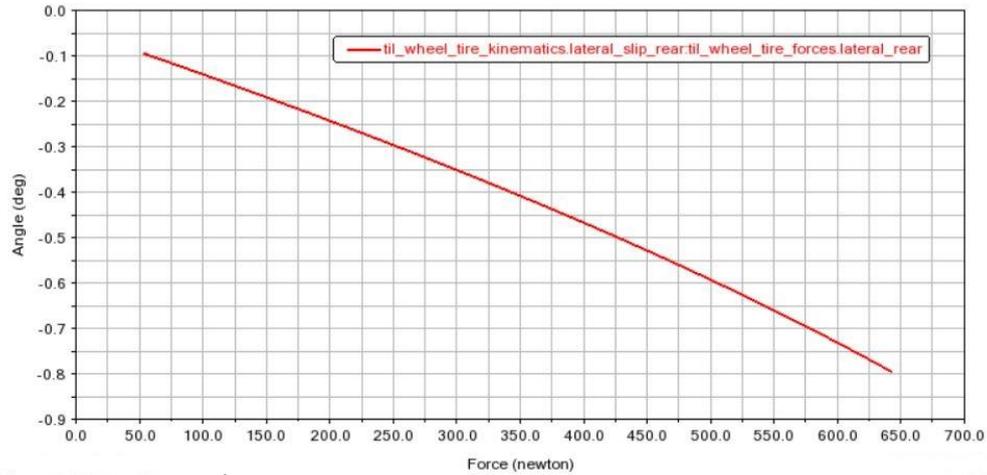


ILUSTRACIÓN 4.22 - ÁNGULO DE DERIVA VS FUERZA LATERAL RUEDA IZQ-TRAS (PPC)

En este caso, las fuerzas laterales, como ya se vieron anteriormente, son más pequeñas, teniendo una relación lineal con respecto al ángulo de deriva.

Los puntos obtenidos se muestran a continuación:

	F_y (N)	Ángulo deriva (β) (grados)	Ángulo deriva (β) (rad)
1	88	-0,1286	-0,0022445
2	128	-0,1688	-0,0029461
3	186	-0,22	-0,0038397
4	228	-0,2724	-0,0047543
5	292	-0,3426	-0,0059795
6	335	-0,3913	-0,0068295
7	386	-0,4511	-0,0078732
8	421	-0,4925	-0,0085957
9	457	-0,5376	-0,0093829
10	521	-0,6204	-0,010828

La gráfica que se obtiene con los puntos anteriores y su línea de tendencia con ajuste lineal se muestran seguidamente:

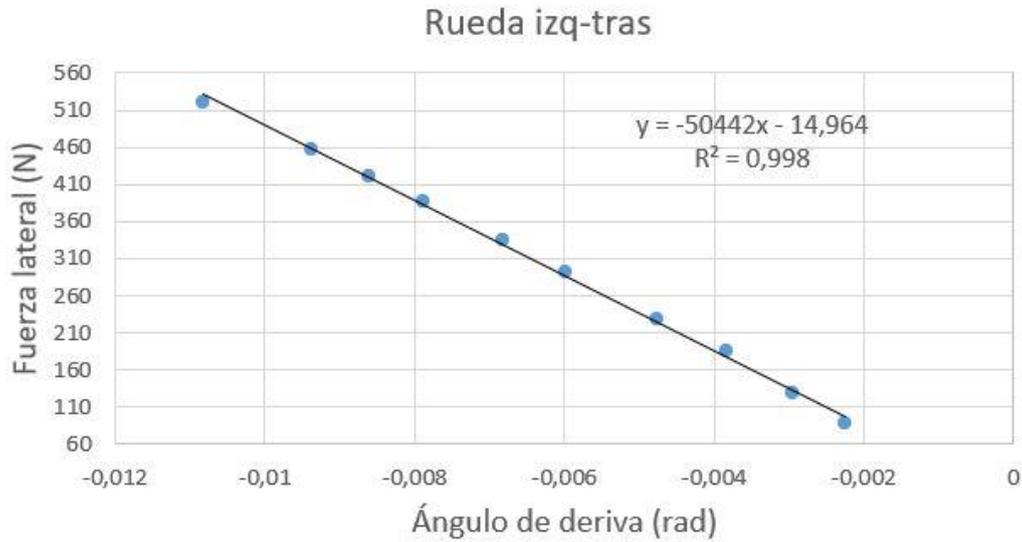


ILUSTRACIÓN 4.22 – AJUSTE LINEAL RUEDA IZQ-TRAS

A continuación, se ve la rueda derecha trasera:

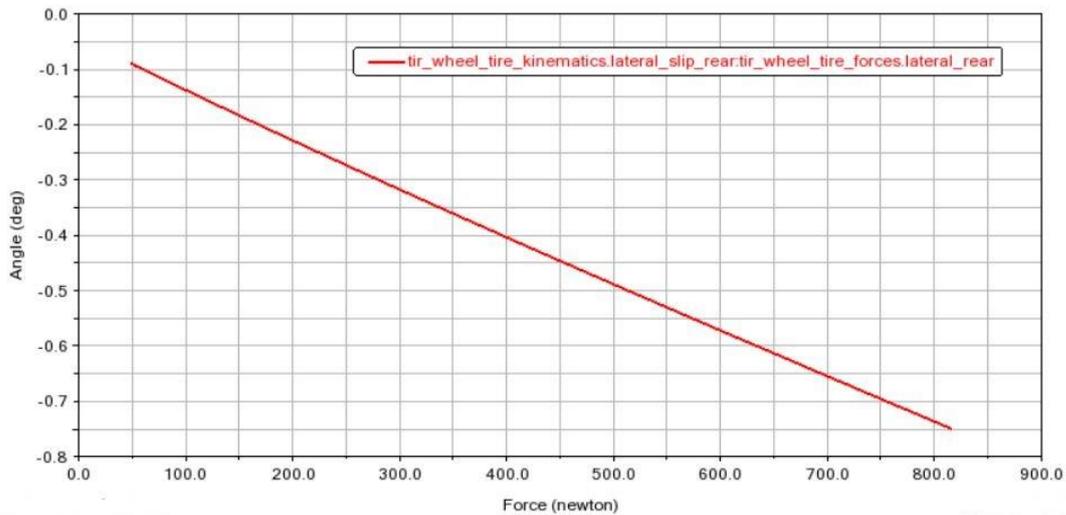


ILUSTRACIÓN 4.24 - ÁNGULO DE DERIVA VS FUERZA LATERAL RUEDA DER-TRAS (PPC)

En esta rueda también se tiene una relación lineal de la fuerza lateral ejercida y del ángulo de deriva como se puede observar.

Los puntos obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

	F_y (N)	Ángulo deriva (β) (grados)	Ángulo deriva (β) (rad)
1	95	-0,133	-0,0023213
2	150	-0,1842	-0,0032149
3	203	-0,2316	-0,0040422
4	279	-0,2991	-0,0052203
5	361	-0,3708	-0,0064717
6	431	-0,4301	-0,0075067
7	494	-0,4832	-0,0084334
8	549	-0,5299	-0,0092485
9	605	-0,5764	-0,0100601
10	718	-0,6696	-0,0116867

La gráfica que se obtiene con los puntos anteriores y su línea de tendencia se muestran a continuación:

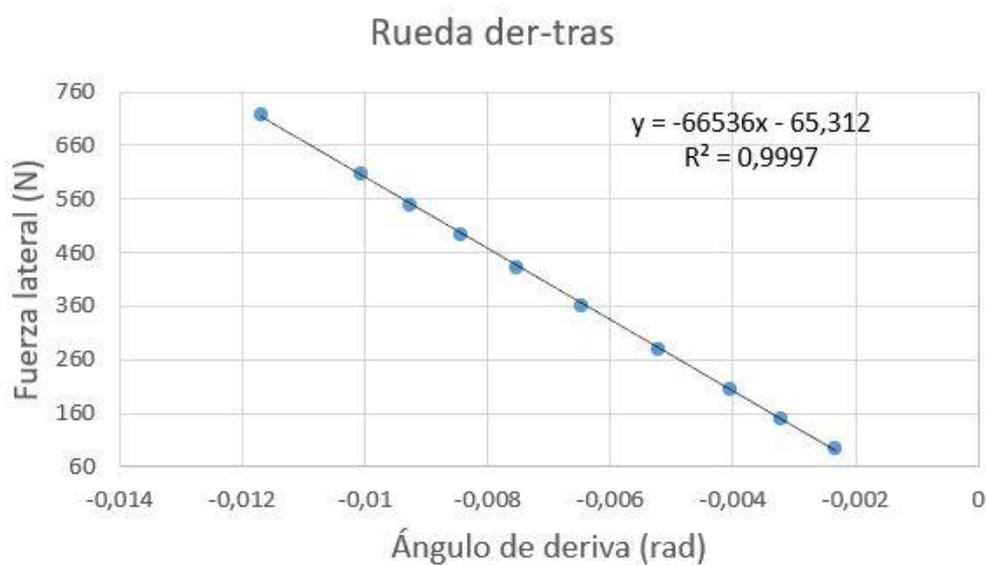


ILUSTRACIÓN 4.25 - AJUSTE LINEAL RUEDA DER-TRAS

En la siguiente tabla se mostrarán esas constantes de rigidez lateral de las 4 ruedas:

	DELANTERO	TRASERO
IZQUIERDA	-62615 N	-50422 N
DERECHA	-97603 N	-66536 N

Como se puede observar, cada rueda tiene un valor distinto. Al ser las 4 ruedas iguales, deberían de dar una constante de rigidez lateral similar pero no es el caso. Esto se debe a las otras fuerzas ejercidas ya que son diferentes para cada rueda

Las ruedas del lado derecho tienen un valor mayor (hablando en términos de valor absoluto) debido a que el giro se produce a izquierdas y las fuerzas normales son mucho más grandes en este lado derecho con el paso del tiempo como se ven en las ilustraciones 4.16 y 4.17. Se puede apreciar sobre todo en la rueda delantera derecha que, aparte de llevarse la mayor fuerza normal, también experimenta una variación grande de la fuerza lateral (ilustración 4.14).

Las ruedas traseras experimentan una menor variación entre ellas debido a que las fuerzas longitudinales y laterales son prácticamente iguales. Se diferencian sobre todo por esa fuerza normal que se desplaza del lado izquierdo al derecho por el giro de la curva.

Si ahora se junta toda la nube de puntos de esas 4 ruedas, la gráfica obtenida sería la siguiente:

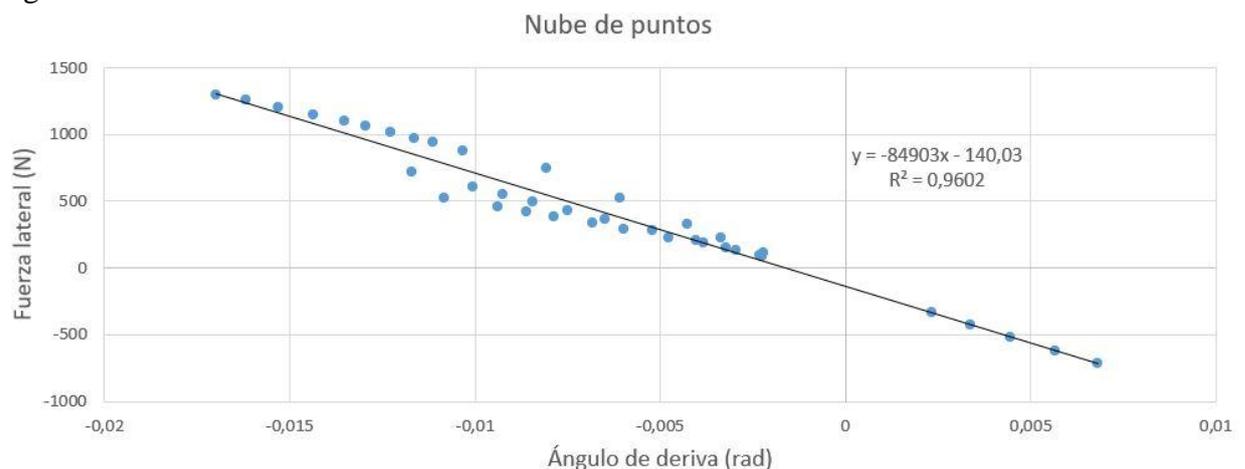


ILUSTRACIÓN 4.26 – AJUSTE LINEAL 4 RUEDAS

En esta gráfica, la pendiente que se muestra en la línea de tendencia ajustada linealmente muestra un valor de -84903 N, correspondiente a la constante de rigidez lateral del neumático en el caso de que las 4 ruedas se comportasen de la misma forma.

4.4 Cambio de carril (CDC)

En este apartado, analizaremos el comportamiento de nuestro vehículo RBK durante el cambio de carril y/o esquivar un obstáculo en la trayectoria realizada.

Para realizar este ensayo, simularemos que el vehículo circula a una velocidad de 20 km/h y tendrá que cambiar de carril bruscamente como si fuera a evitar un obstáculo y luego volverá a su carril inicial de nuevo. Los datos que introduciremos en el programa serán los siguientes:

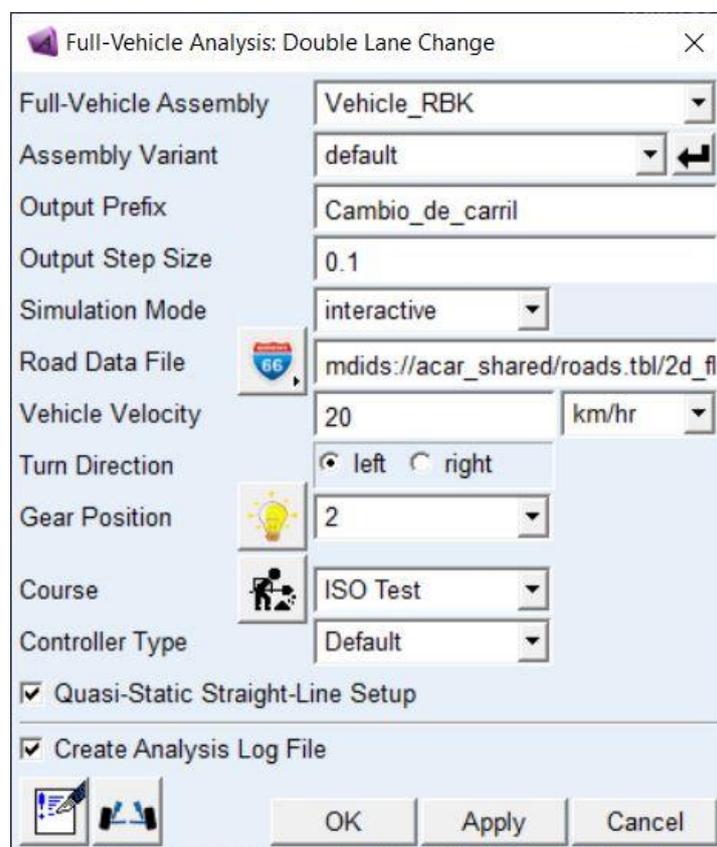


ILUSTRACIÓN 4.27 - CONDICIONES EN LA PRUEBA DE CAMBIO DE CARRIL

A continuación, y como en las pruebas anteriores, se mostrarán los resultados más característicos y se realizarán los respectivos análisis:

En la siguiente gráfica, se verá el giro que se produce en el volante para llevar a cabo la maniobra descrita anteriormente:

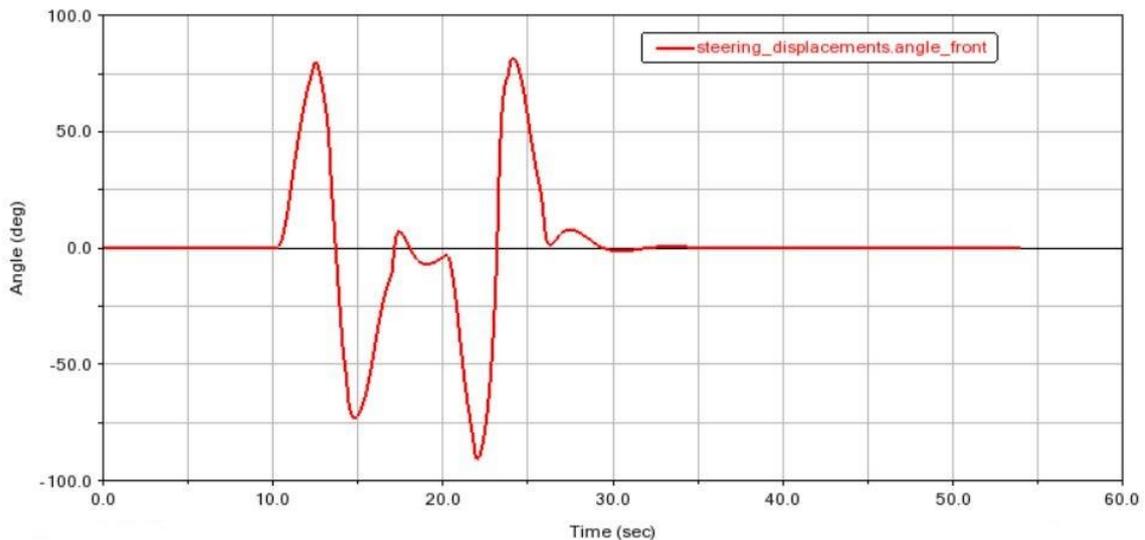


ILUSTRACIÓN 4.28 - GIRO DEL VOLANTE (CDC)

El volante llega a girar un poco más de 75° durante la ejecución de la maniobra.

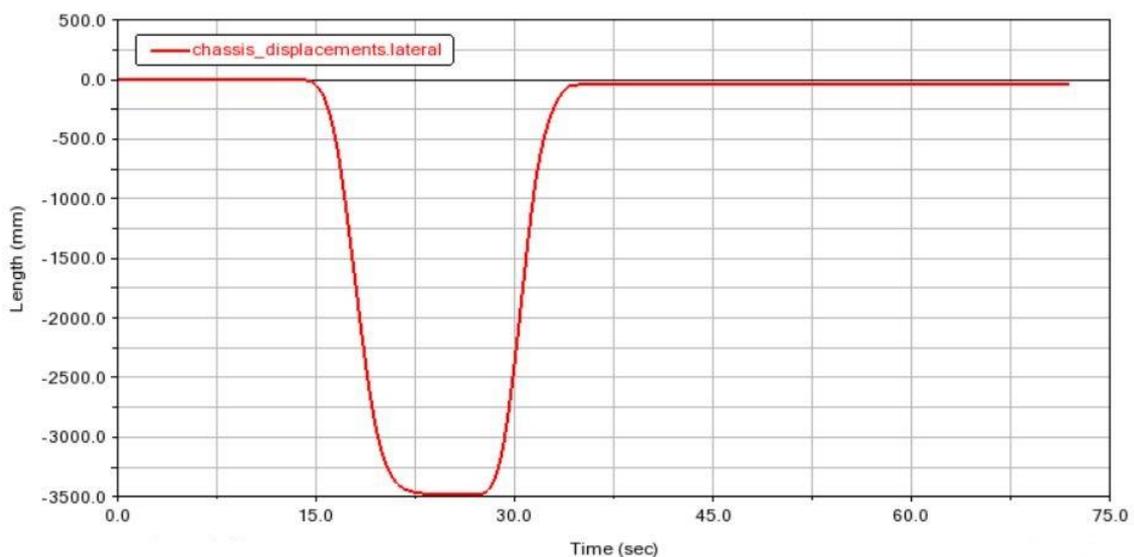


ILUSTRACIÓN 4.29 - DESPLAZAMIENTO LATERAL DEL VEHÍCULO RBK (CDC)

En la gráfica anterior, se puede observar como el vehículo en cuestión realiza un desplazamiento lateral de unos 3,5 metros para llevar a cabo la maniobra de cambio de carril.

A continuación, se mostrará será la velocidad longitudinal del vehículo:

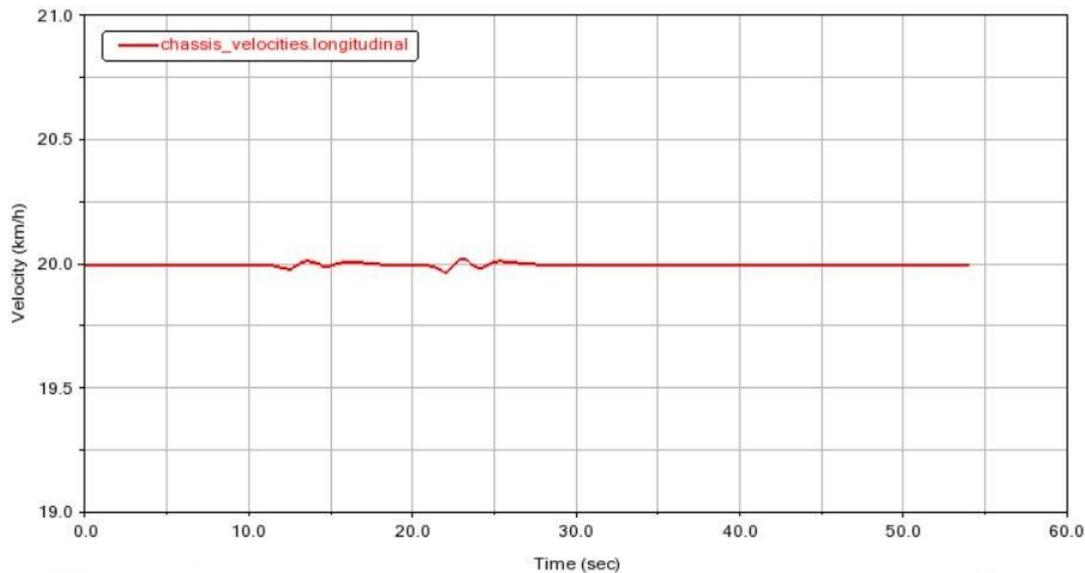


ILUSTRACIÓN 4.30 - VELOCIDAD LONGITUDINAL (CDC)

Se puede comprobar como la velocidad longitudinal es la que habíamos impuesto en las condiciones, tiene ligeras variaciones por la maniobra ejecutada, pero son prácticamente inapreciables.

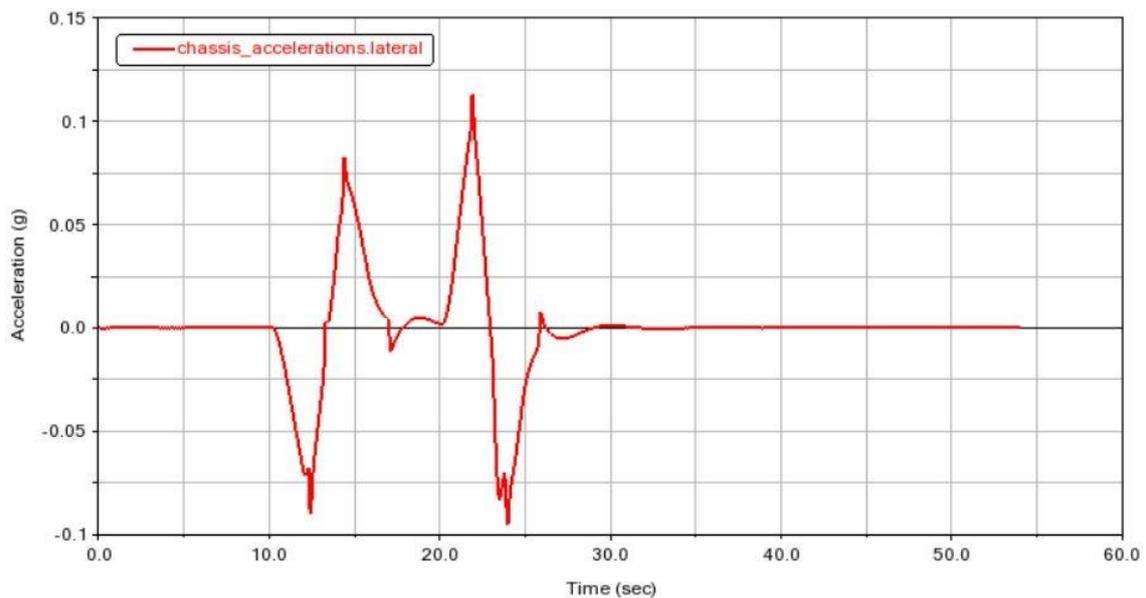


ILUSTRACIÓN 4.31 – ACELERACIÓN LATERAL (CDC)

En esta gráfica se observa la aceleración lateral producida en el vehículo como consecuencia de la maniobra realizada. Los picos tienen un valor que está entre los 0.12g y -0.1g aproximadamente.

Ahora se verán cómo influyen las fuerzas en las ruedas. Las primeras en analizar serán las longitudinales:

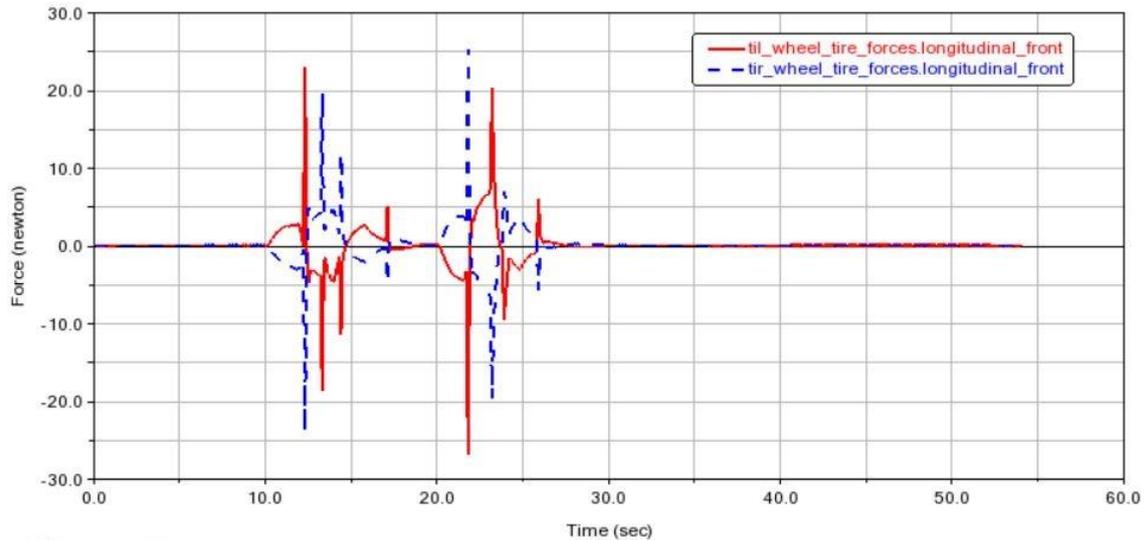


ILUSTRACIÓN 4.32 - FUERZAS LONGITUDINALES DELANTERAS (CDC)

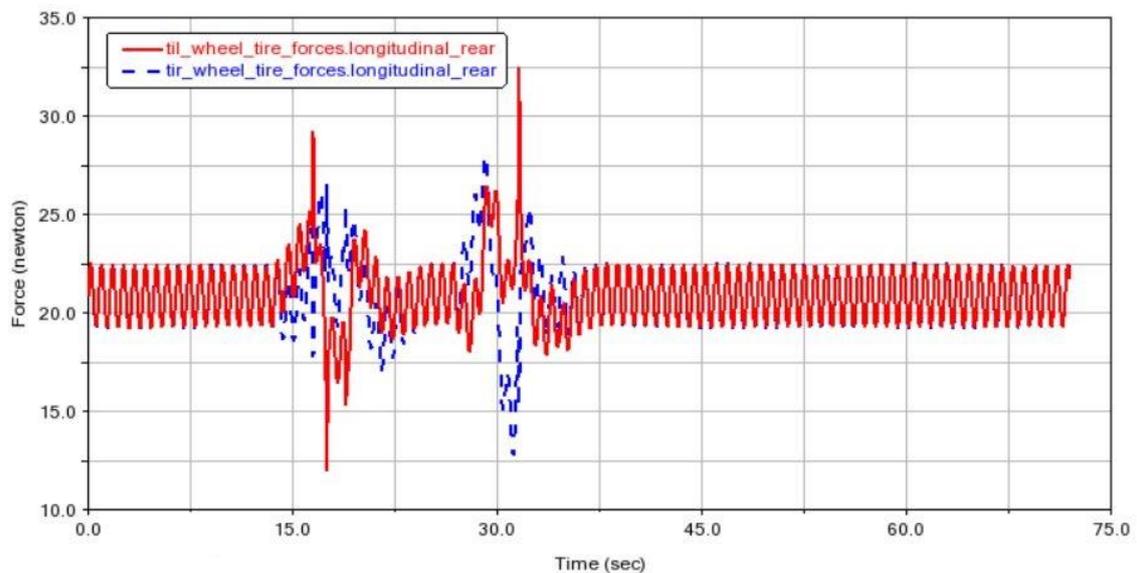


ILUSTRACIÓN 4.33 - FUERZAS LONGITUDINALES TRASERAS (CDC)

Como se puede observar en las gráficas anteriores, las fuerzas longitudinales delanteras son prácticamente nulas y las traseras tienen un valor muy pequeño (originadas por la tracción trasera del vehículo y la rodadura), por lo que estas fuerzas son, en realidad, irrelevantes.

Las fuerzas laterales quedarían como se muestra a continuación:

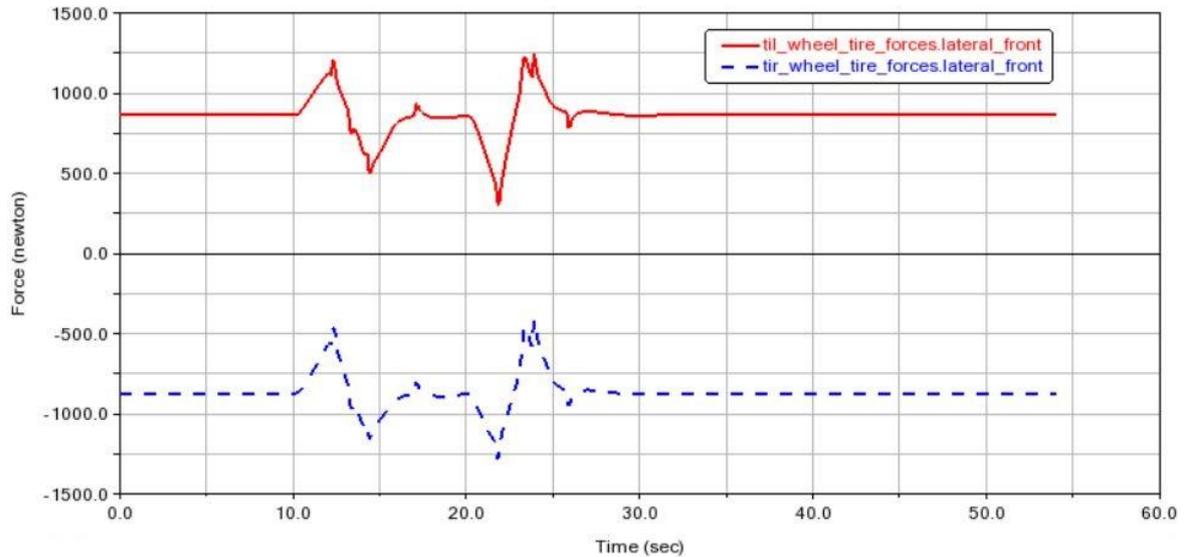


ILUSTRACIÓN 4.34 - FUERZAS LATERALES DELANTERAS (CDC)

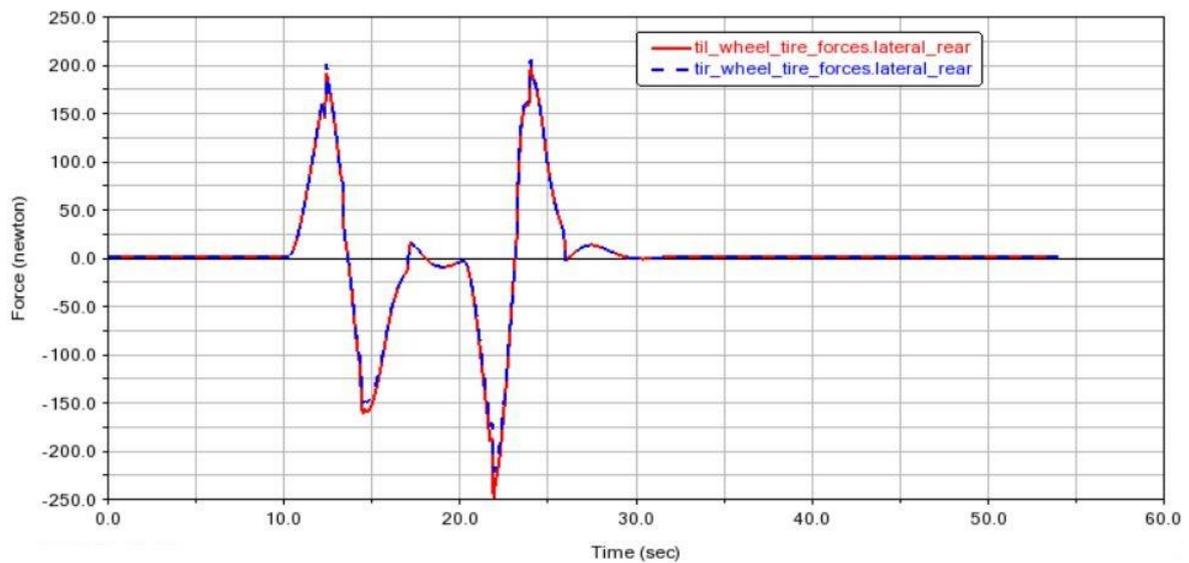


ILUSTRACIÓN 4.35 - FUERZAS LATERALES TRASERAS (CDC)

En las gráficas anteriores se puede observar cómo las fuerzas delanteras son iguales (875 N), pero de signo opuesto por los ángulos de las ruedas. Cuando en una rueda aumenta la fuerza, en la otra disminuye y viceversa, al producirse la maniobra impuesta. Los picos máximos producidos son de 1250 N y -1250 N aproximadamente. En las ruedas traseras, las fuerzas son totalmente iguales en ambos lados y solo se generan al ejecutar la maniobra con picos de 200 N hasta -250 N.

Finalmente, las fuerzas normales producidas en las ruedas se muestran en las siguientes gráficas:

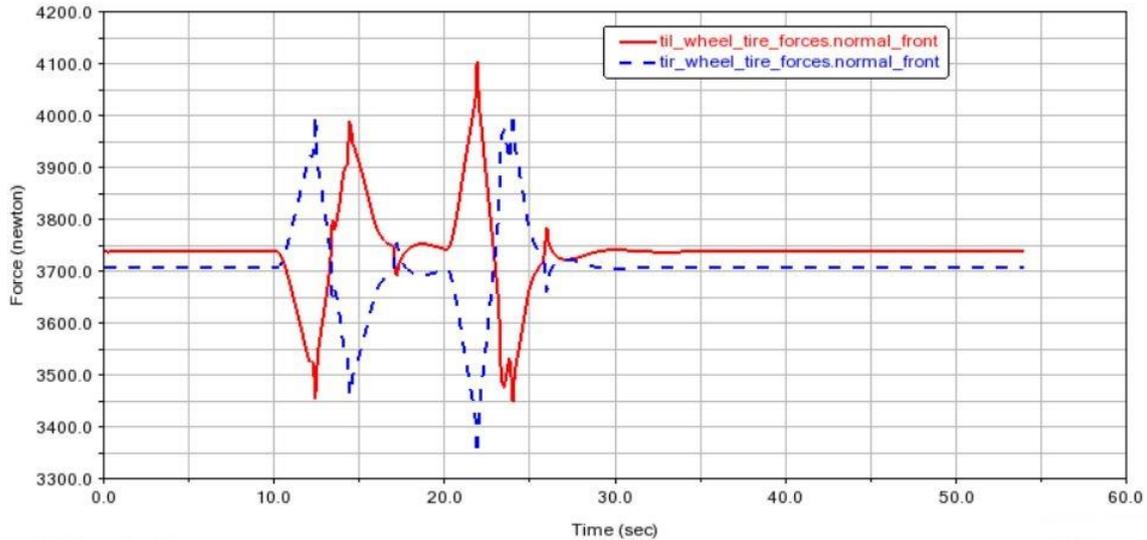


ILUSTRACIÓN 4.36 - FUERZAS NORMALES DELANTERAS (CDC)

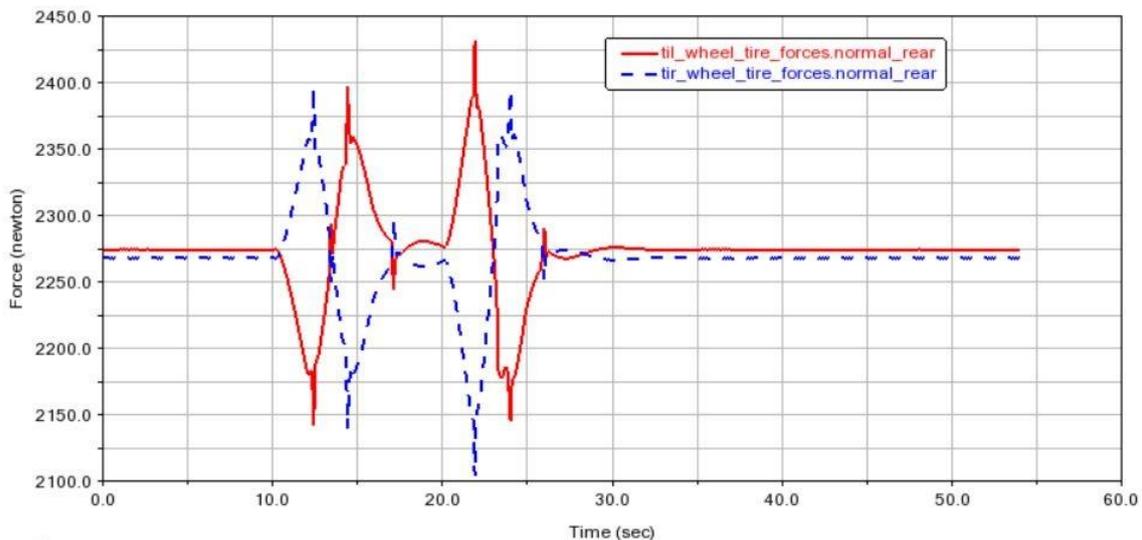


ILUSTRACIÓN 4.37 - FUERZAS NORMALES TRASERAS (CDC)

En estas fuerzas, se puede apreciar perfectamente como al producirse la maniobra, se produce también una variación en ambas ruedas, iguales y de sentido contrario, cuando aumenta la fuerza normal en la rueda derecha, disminuye en la izquierda y cuando aumenta en la izquierda, disminuye en la derecha. Esto se produce por el mismo motivo que se explica en el caso de las fuerzas normales de la prueba de paso por curva, al realizar el giro, se produce un cambio en el centro de masas y el lado al que se desplaza, es el lado que obtiene mayor fuerza normal. Se puede observar un valor inicial fijo de 3750 N en las ruedas delanteras y de 2275 N en las ruedas traseras, teniendo un pico de 4100 y 2430 N respectivamente en la rueda izquierda.

4.5 Conducción por una trayectoria específica

En este apartado se realizará la conducción de nuestro vehículo RBK por una trayectoria específica creada por nosotros como es la que se muestra en la siguiente imagen:

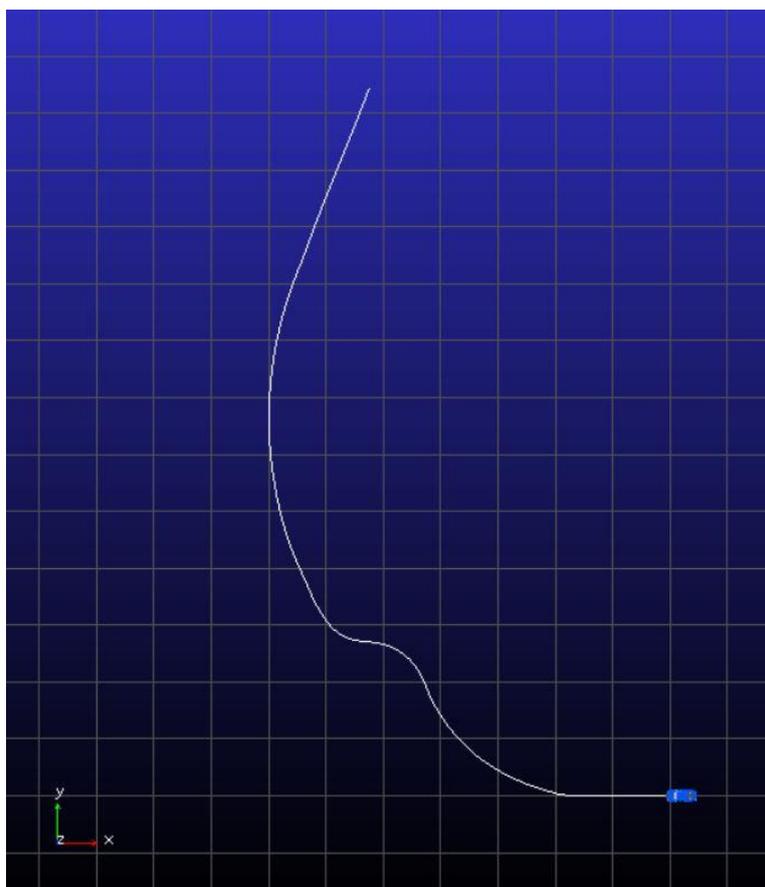


ILUSTRACIÓN 4.38 - TRAYECTORIA ESPECÍFICA EN ADAMS CAR

Para llevar a cabo la realización de esa trayectoria, se ha seleccionado el creador de eventos de Adams Car (*“Event Builder”*) y se ha creado desde ahí mediante la combinación de, en este caso, 6 mini-maniobras: dos rectas (una al inicio y otra al final), tres giros a derechas y un giro a izquierda.

En la siguiente imagen se podrá ver la configuración de la trayectoria realizada:

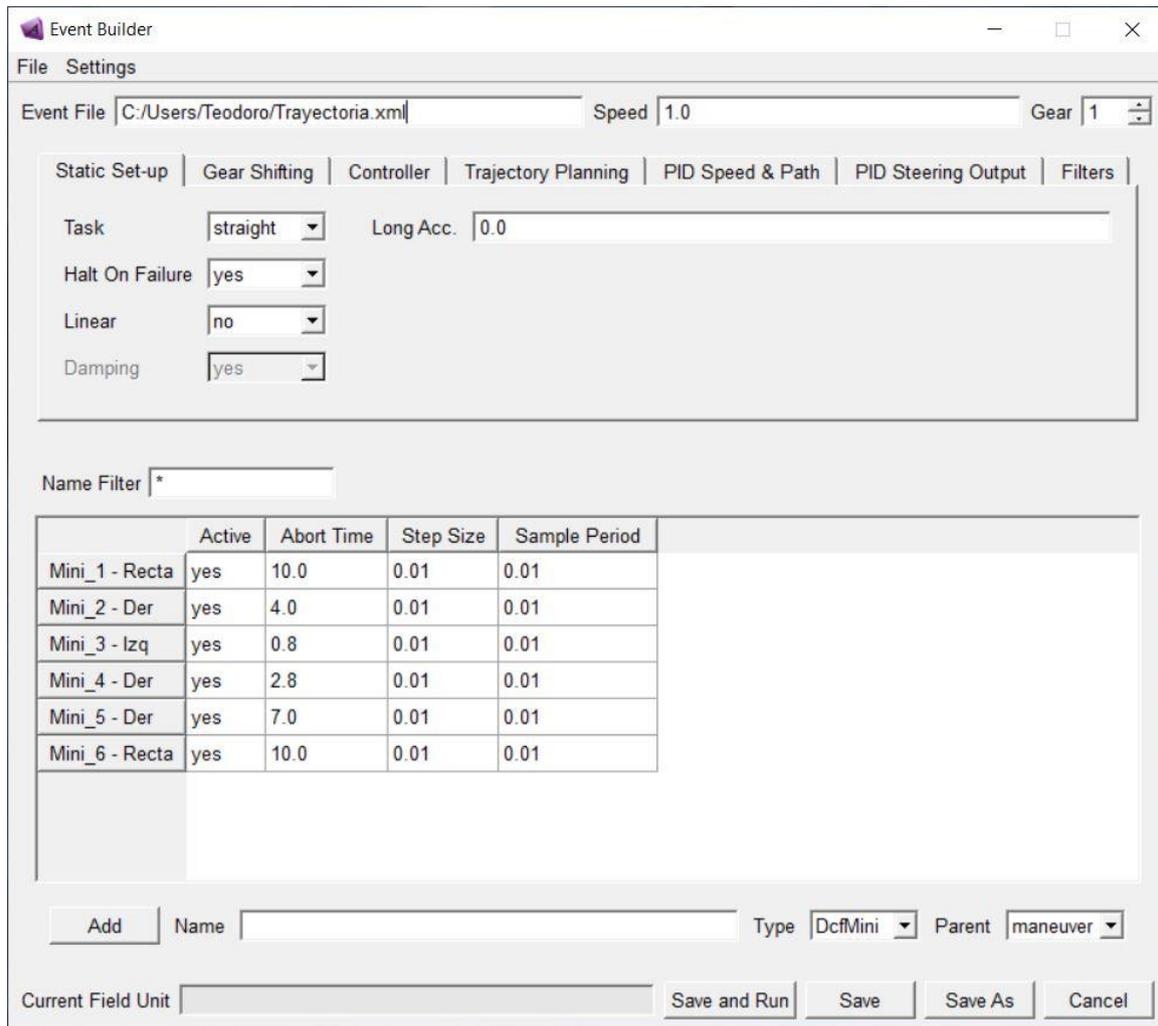


ILUSTRACIÓN 4.39 - CREACIÓN DE LA TRAYECTORIA

Como se muestra en la imagen, se realizará la trayectoria partiendo de una velocidad inicial de 1 m/s (3.6 km/h). La marcha puesta sería irrelevante ya que nuestro motor no posee caja de cambios. Y la opción de configuración estática será *“Straight”*. Este método lo que hace es bloquear la posición delantera y trasera del cuerpo con una articulación primitiva y ADAMS Car ajusta la dirección para que la velocidad de guiñada y la aceleración lateral del vehículo sean cero y el acelerador y/o freno para equilibrar la resistencia aerodinámica y el arrastre que producen los neumáticos y que coincida con la aceleración longitudinal inicial especificada. Este a su vez se compone de dos análisis estáticos separados: el primero usa el método de asentamiento y el segundo usa un equilibrio de fuerza en la carrocería del vehículo para asegurar que la fuerza lateral neta sea negativa ya que el vehículo viaja en línea recta y que las fuerzas longitudinales sean cero.

Las demás opciones de configuración se dejarán por defecto (*“Gear shifting”*, *“Controller”*, *“Trajectory Planning”*, *“PID”*, etc).

Como se puede observar también, dicha trayectoria está compuesta por 6 mini-maniobras que se explicarán a continuación:

Las 6 mini-maniobras tendrán un tipo de actuador de rotación en la configuración de la dirección, esto significa que la máquina de conducción girará con un movimiento en el volante. También el método de control para la dirección, acelerador, freno, marchas y embrague será por máquina, por lo que para la dirección deberemos especificar la ruta de destino utilizando el control de dirección y para el acelerador y freno se debe especificar el perfil de velocidad objetivo con el control de velocidad.

- 1- Recta: La primera mini-maniobra será una recta con un control de dirección como se ve en la siguiente imagen:

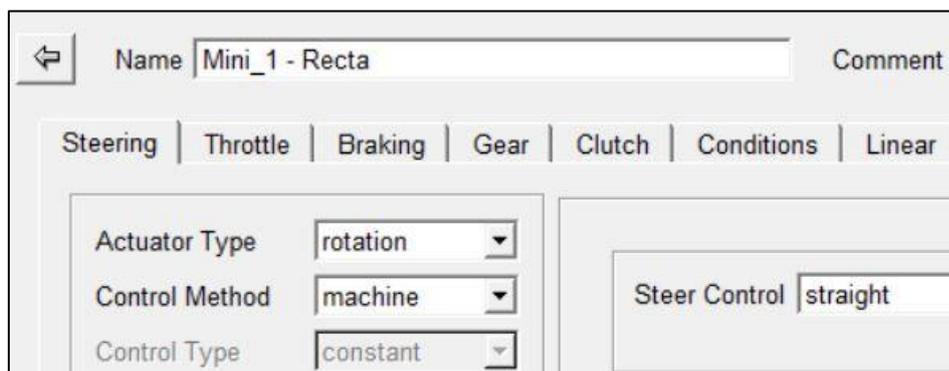


ILUSTRACIÓN 4.40 – CONTROL DE DIRECCIÓN MINI-MANIOBRA 1

Para el acelerador, se pondrá un controlador para proporcionar una aceleración longitudinal de 0.2g (1.962 m/s²) equivalente al valor máximo del resultado en la prueba de aceleración del apartado 4.1.

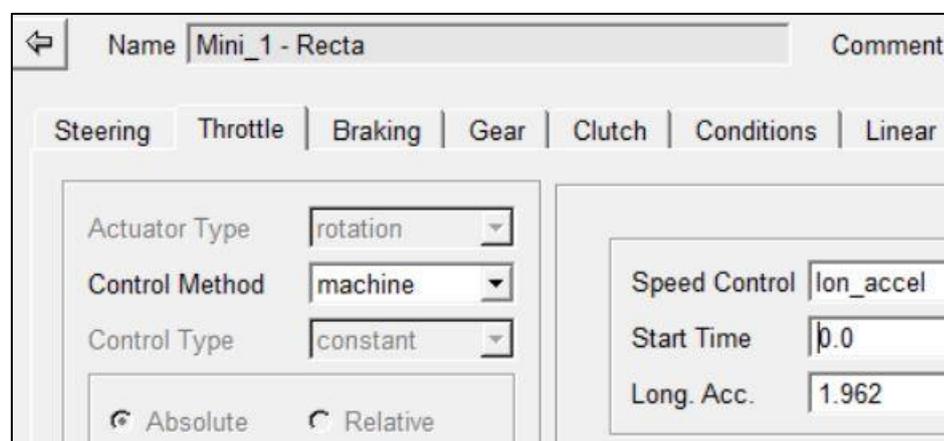


ILUSTRACIÓN 4.41 - CONTROL DEL ACELERADOR MINI-MANIOBRA 1

Como condición final se pondrá que la mini-maniobra finalice y pase a la siguiente cuando el vehículo alcance la velocidad de 8.4 m/s (30 km/h), velocidad muy cercana a su velocidad máxima.

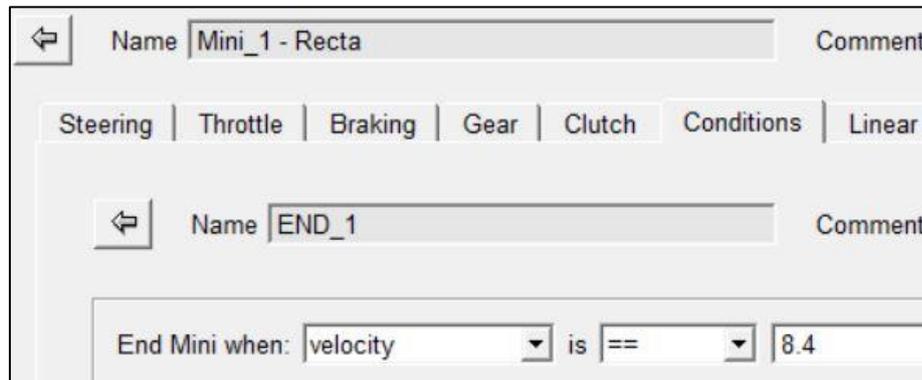


ILUSTRACIÓN 4.42 - CONDICIÓN FINAL MINI-MANIOBRA 1

- 2- Giro derecha: En la segunda mini-maniobra se realizará un giro a derechas con un radio de 30 m como se ve en la siguiente imagen de control de dirección:

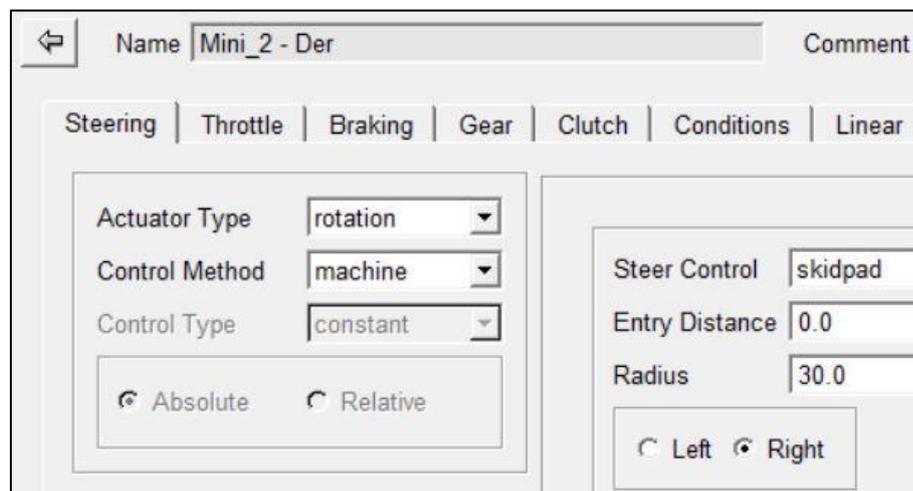


ILUSTRACIÓN 4.43 - CONTROL DE DIRECCIÓN MINI-MANIOBRA 2

En este caso, en el control del acelerador se pondrá la condición de que la velocidad sea la misma con la que finalizó la mini-maniobra anterior y se mantenga, es decir, sea de 30 km/h durante la ejecución de esta mini-maniobra.

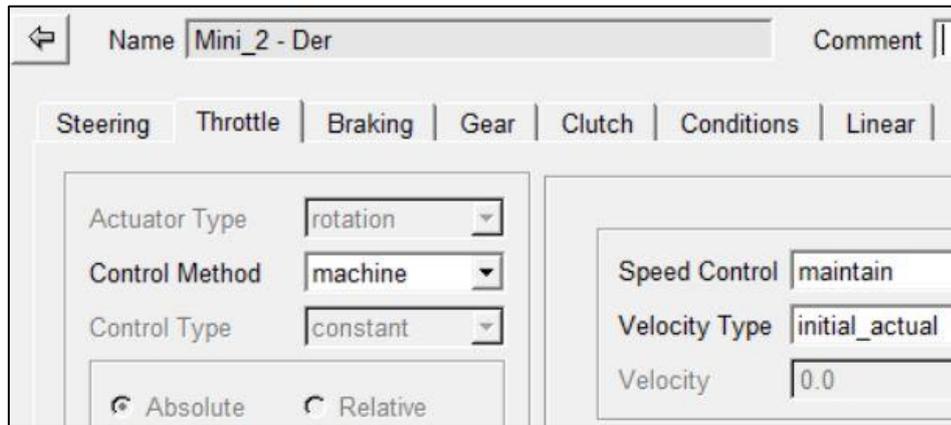


ILUSTRACIÓN 4.44 - CONTROL DEL ACELERADOR MINI-MANIOBRA 2

En este caso no se impondrá condición final por lo que la mini-maniobra finalizará cuando se cumplan los 4 s que se impusieron.

- 3- Giro izquierda: La tercera mini-maniobra será un giro a izquierdas con un radio de 6 m como se ve en el control de dirección a continuación:

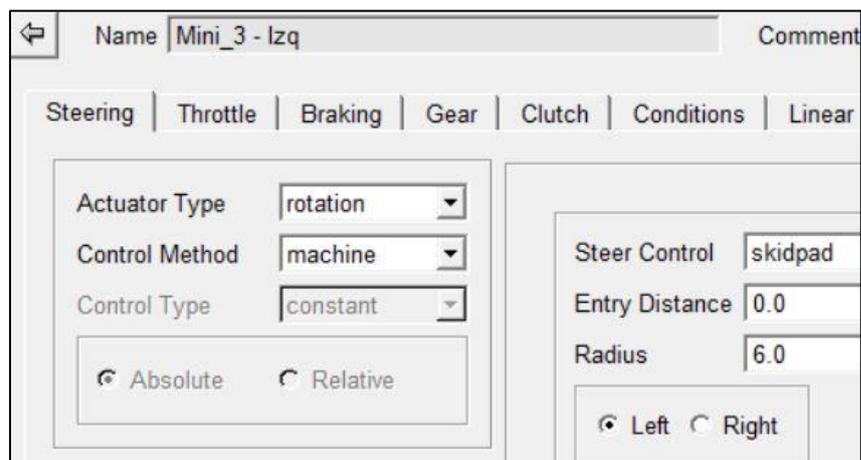


ILUSTRACIÓN 4.45 - CONTROL DE DIRECCIÓN MINI-MANIOBRA 3

El control del acelerador será exactamente igual que en el caso anterior, se mantendrá la velocidad de 30 km/h y tampoco se impondrá condición final por lo que la mini-maniobra finalizará al cabo de 0.8 s.

- 4- Giro derecha: En la cuarta mini-maniobra se realizará un giro a derechas con un radio de 28 m como se ve en la siguiente imagen de control de dirección:

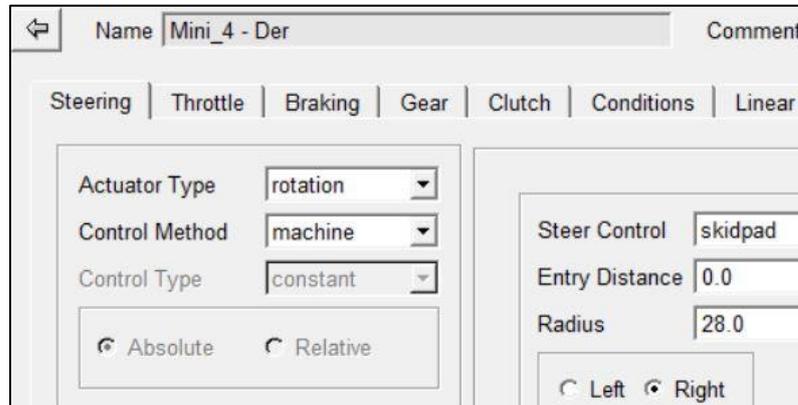


ILUSTRACIÓN 4.46 - CONTROL DE DIRECCIÓN MINI-MANIOBRA 4

En el control del acelerador se mantendrá la velocidad y no se impondrá condición final por lo que la mini-maniobra finalizará al cabo de 2.8 s.

- 5- Giro derecha: En la quinta mini-maniobra se realizará otro giro a derechas seguido con un radio de 70 m como se puede ver en la imagen de control de dirección a continuación:

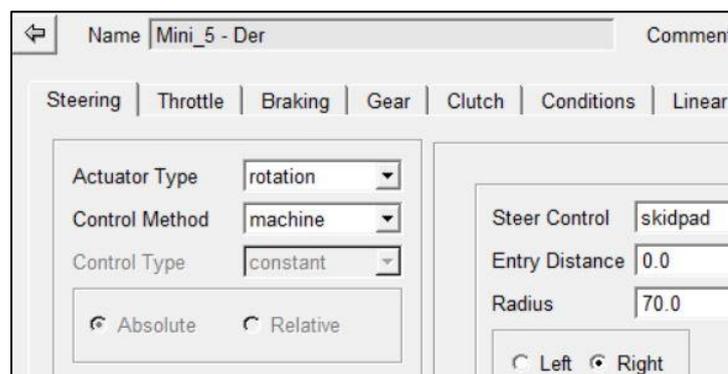


ILUSTRACIÓN 4.47 - CONTROL DE DIRECCIÓN MINI-MANIOBRA 5

En el control del acelerador se mantendrá la velocidad y no se impondrá condición final por lo que la mini-maniobra finalizará al cabo de 7 s.

- 6- Recta: La última mini-maniobra será una recta con el mismo control de dirección que en la primera mini-maniobra que se realizó. En este caso también se tendrá un control del acelerador, pero con una aceleración longitudinal negativa de -1 m/s^2 ya que se quiere frenar el vehículo. En la siguiente imagen se muestra ese controlador:

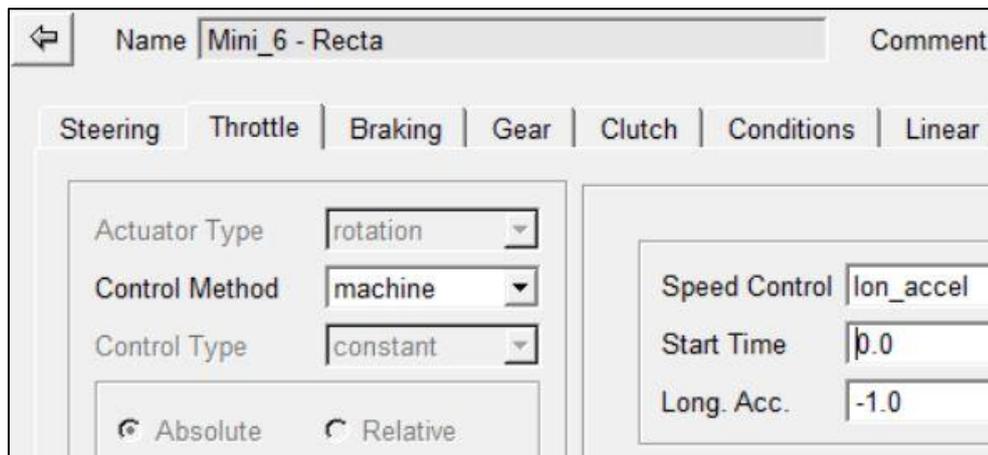


ILUSTRACIÓN 4.48 - CONTROL DEL ACELERADOR MINI-MANIOBRA 6

Como condición final se impondrá que el vehículo tenga una velocidad final menor a 1 m/s :



ILUSTRACIÓN 4.49 – CONDICIÓN FINAL MINI-MANIOBRA 6

Al acabar esta mini-maniobra, el vehículo debe haber completado la trayectoria indicada y debe pararse.

Una vez creada la trayectoria, se procederá a realizar la simulación. Para ello, se pulsará la opción de “*Save and run*” disponible en la ventana de creación de eventos y nos llevará a otra ventana como la que se ve a continuación en la que daremos nombre a nuestra simulación y elige por defecto la trayectoria que hemos creado anteriormente:

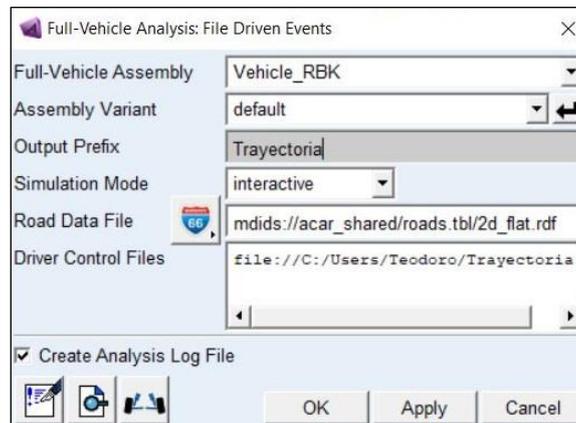


ILUSTRACIÓN 4.50 - CONDICIONES DE LA SIMULACIÓN DE LA TRAYECTORIA

Una vez realizada la simulación, se analizarán los resultados obtenidos en las gráficas que se mostrarán a continuación:

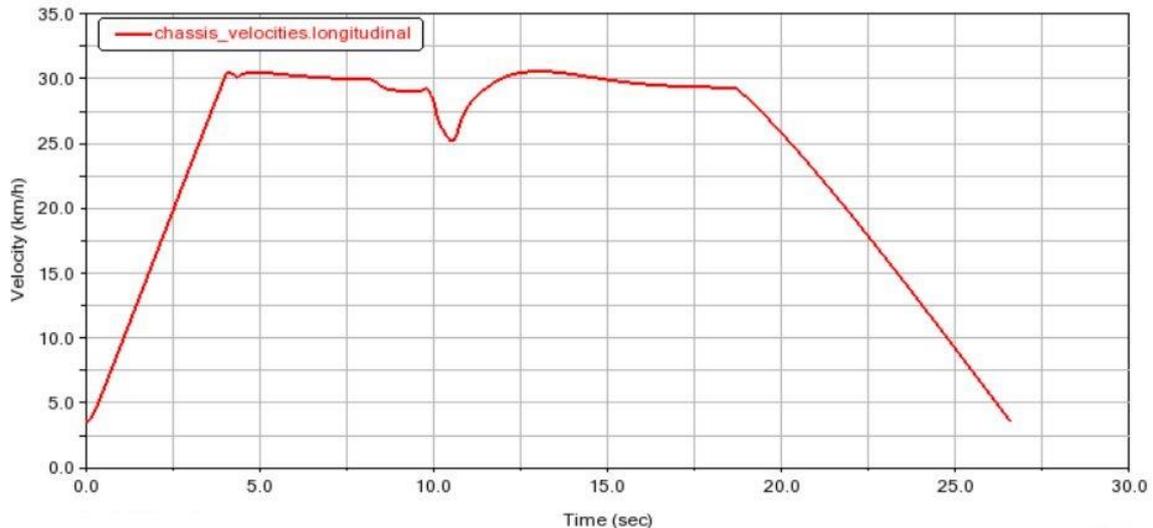


ILUSTRACIÓN 4.51 - VELOCIDAD LONGITUDINAL VEHÍCULO RBK EN LA TRAYECTORIA

La primera gráfica que se analizará será la velocidad del vehículo RBK durante la circulación por dicha trayectoria. Como se puede observar, el vehículo acelera de 3.6 km/h hasta los 30 km/h durante los primeros 4 s como se ha impuesto. Después esa velocidad se mantiene, teniendo una leve variación cuando el vehículo está girando hacia la izquierda y cambia para girar hacia la derecha. Finalmente se produce el frenado hasta los 3.6 km/h en unos 8 s.

A continuación, se analizarán las aceleraciones tanto longitudinal como lateral que se producen en el vehículo durante el transcurso de la trayectoria:

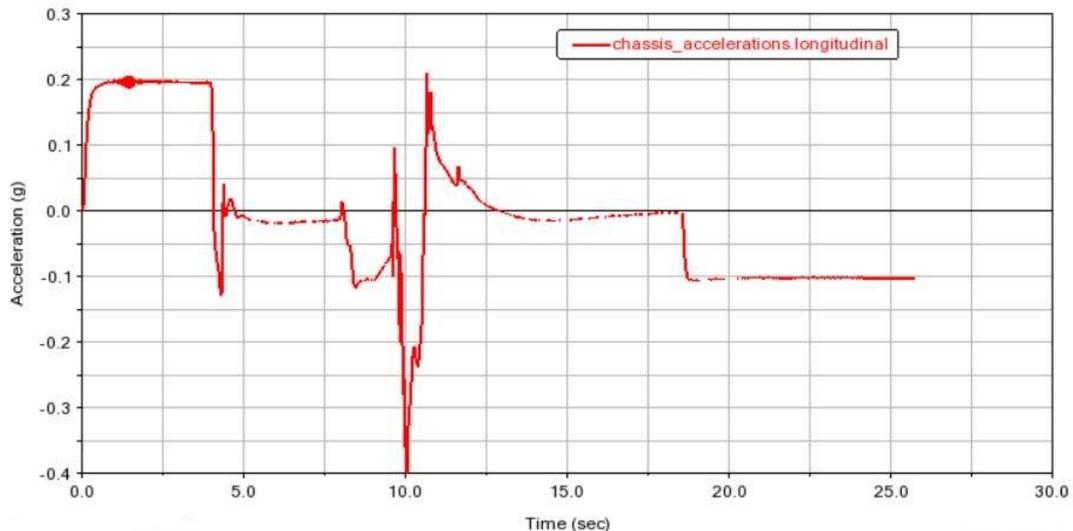


ILUSTRACIÓN 4.52 - ACELERACIÓN LONGITUDINAL VEHÍCULO RBK EN LA TRAYECTORIA

En la gráfica se puede ver esa aceleración longitudinal inicial impuesta de 0.2g. Luego se produce variaciones en la aceleración tanto negativas como positivas cuando se producen los giros impuestos, en especial, cuando el vehículo pasa de estar girando a la izquierda para girar a la derecha, que se produce un pico negativo en la aceleración por lo que seguidamente se acelera para seguir manteniendo la velocidad indicada. En el último tramo se puede observar la aceleración negativa impuesta de -0.1g para realizar el frenado.

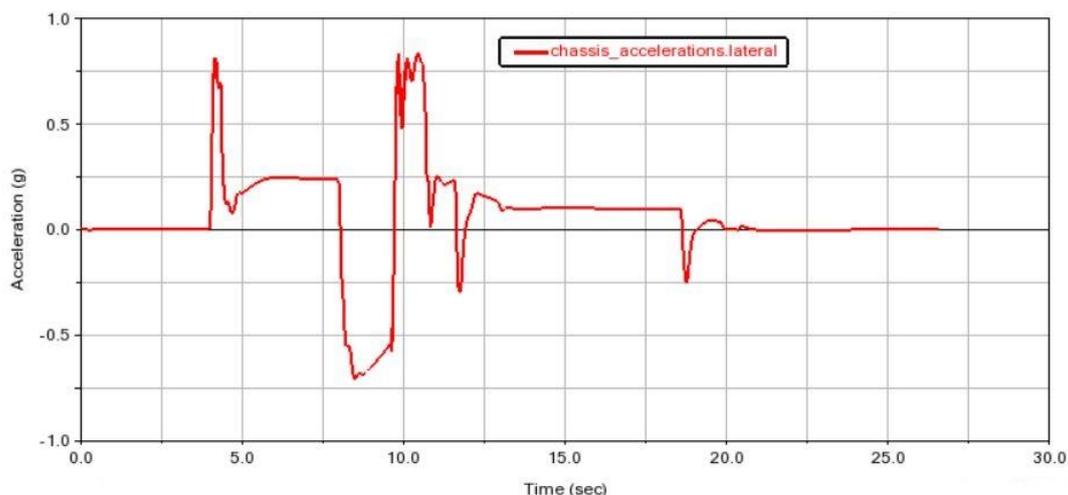


ILUSTRACIÓN 4.53 - ACELERACIÓN LATERAL VEHÍCULO RBK EN LA TRAYECTORIA

Las aceleraciones laterales tienen una especial importancia cada vez que se produce un giro brusco en la trayectoria, llegando a un pico positivo de 0.8g en los dos primeros giros hacia la derecha y un pico negativo de -0.7g cuando gira hacia la izquierda.

Ahora se analizarán los desplazamientos producidos:

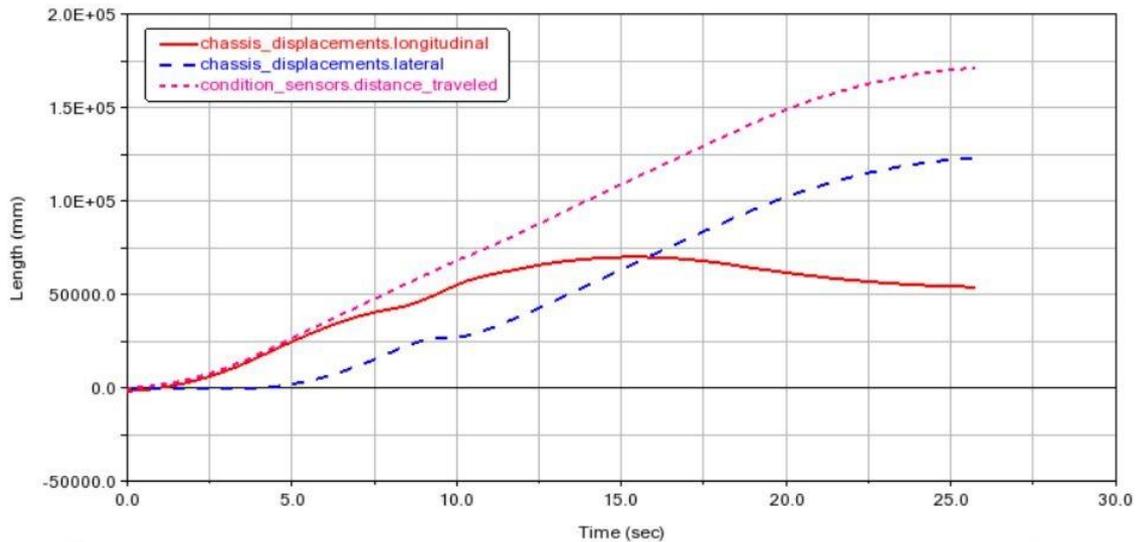


ILUSTRACIÓN 4.54 - DESPLAZAMIENTOS DEL VEHÍCULO RBK EN LA TRAYECTORIA

En la gráfica mostrada anteriormente se ven cómo se producen tanto el desplazamiento longitudinal como el lateral, teniendo una distancia total recorrida de unos 175 m aproximadamente durante los 26 s que se tarda en recorrer la trayectoria elegida.

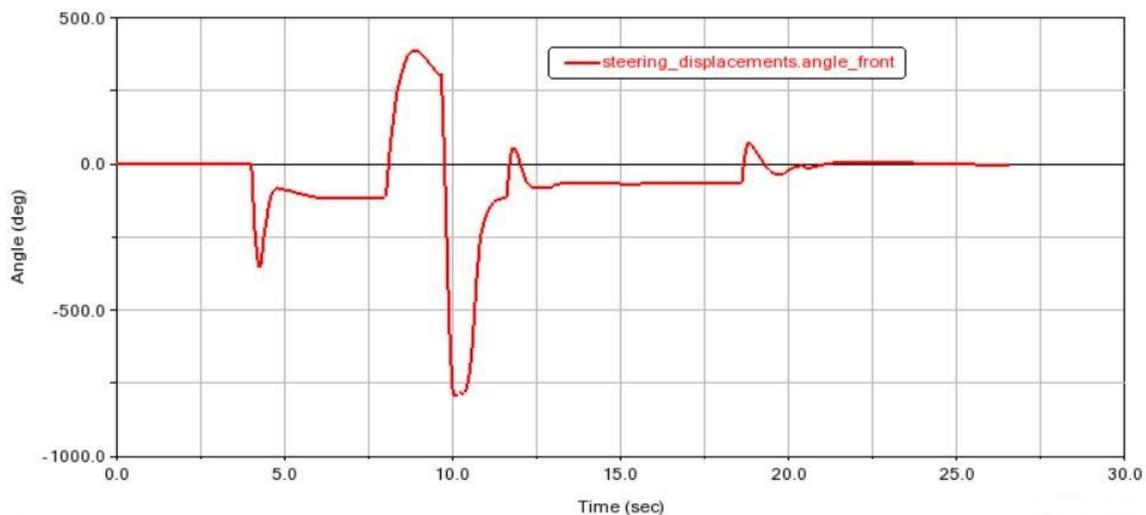


ILUSTRACIÓN 4.55 - ÁNGULO DE DIRECCIÓN DEL VEHÍCULO RBK EN LA TRAYECTORIA

Esta gráfica muestra cómo se produce el giro de la dirección expresado en grados durante la trayectoria. Cuando el vehículo gira hacia la derecha el ángulo es negativo y cuando gira hacia la izquierda es positivo. Los giros de mayor ángulo ocurren cuando el radio de la curva es menor y en algunos cambios de radio incluso se contravolantea para mantener la trayectoria elegida.

Por último, se analizarán las fuerzas producidas en las ruedas:

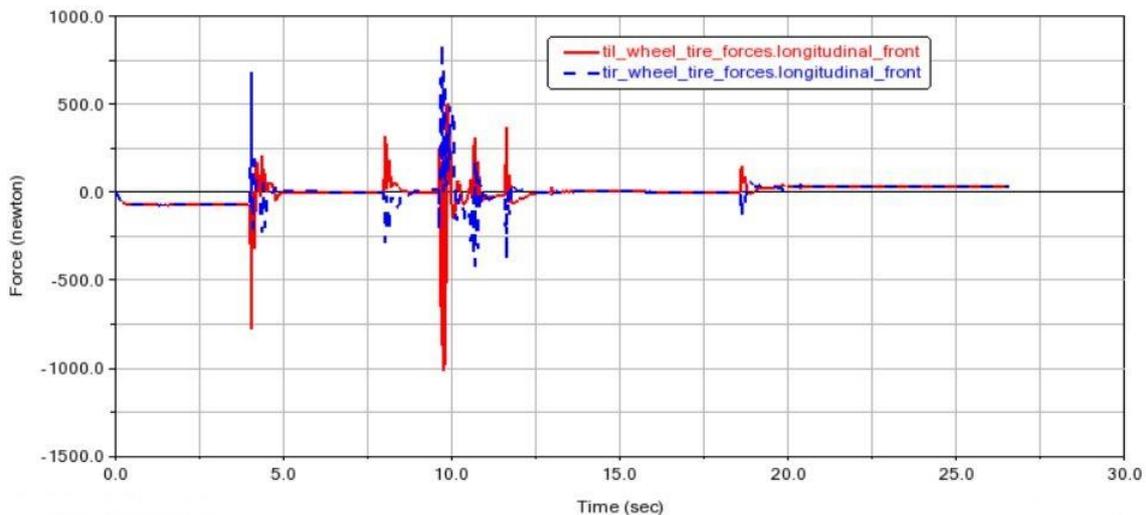


ILUSTRACIÓN 4.56 - FUERZAS LONGITUDINALES DELANTERAS EN LA TRAYECTORIA

Estas fuerzas longitudinales delanteras son prácticamente nulas, originadas por la rodadura y se producen picos momentáneos únicamente cuando se produce un giro en la dirección. Al girar hacia la derecha se produce un pico de fuerza negativa en la rueda izquierda y uno de fuerza positiva en la rueda derecha y al contrario cuando se produce el giro hacia la izquierda. Pico máximo negativo de -1000 N en la rueda izquierda y positivo de 800 N en la rueda derecha.

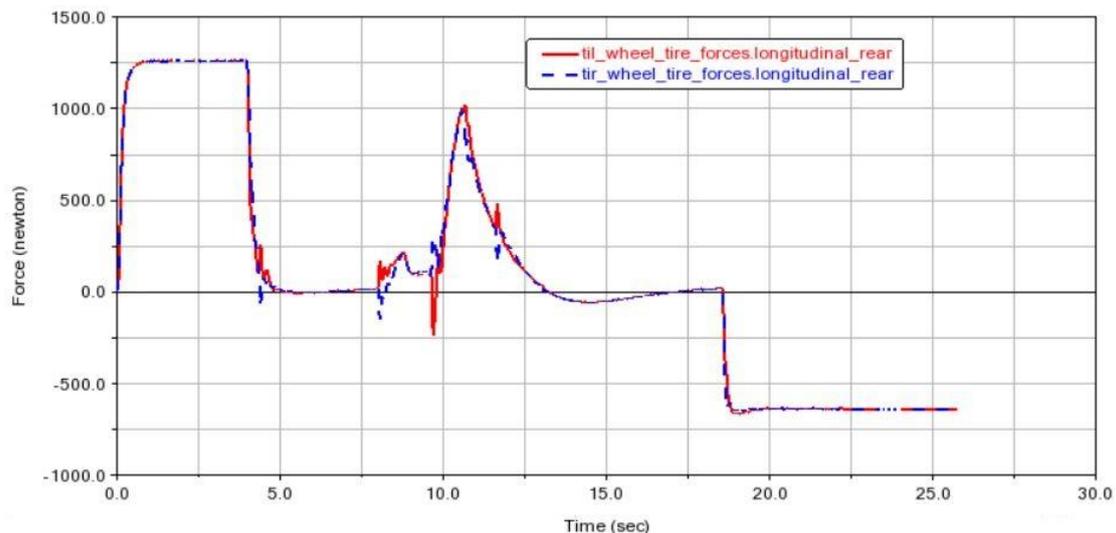


ILUSTRACIÓN 4.57 - FUERZAS LONGITUDINALES TRASERAS EN LA TRAYECTORIA

Las fuerzas longitudinales traseras son prácticamente iguales en la rueda izquierda y derecha y se producen solamente cuando existe aceleración y tracción en el vehículo como se puede observar sobre todo al inicio donde se impone la aceleración positiva y al final donde está la aceleración negativa para el frenado. El pico central se debe al instante en el que acelera debido a la pérdida de velocidad comentada anteriormente.

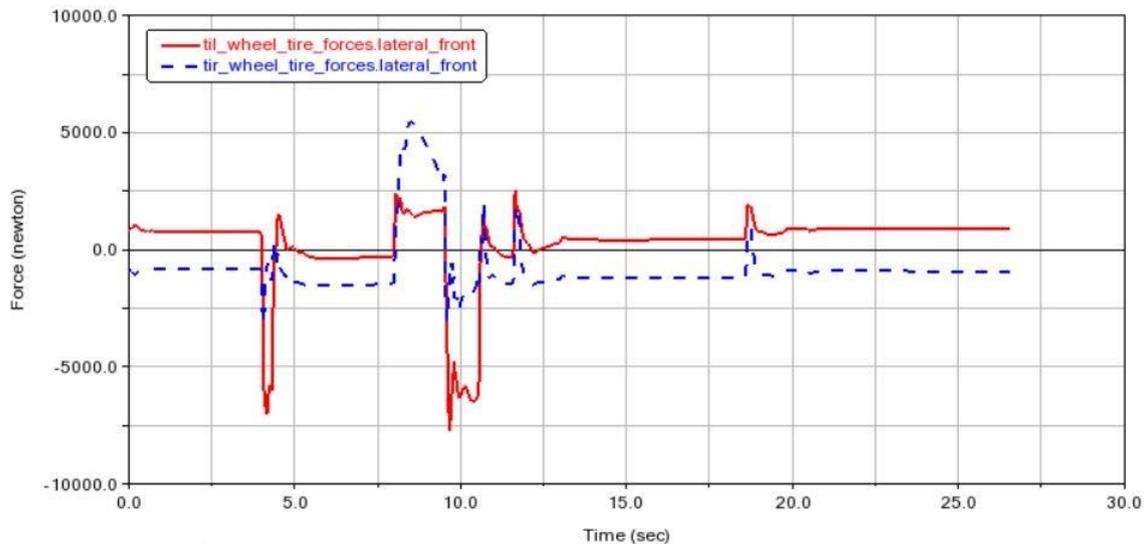


ILUSTRACIÓN 4.58 - FUERZAS LATERALES DELANTERAS EN LA TRAYECTORIA

Las fuerzas laterales delanteras en recta son iguales de signo contrario debido a los ángulos de las ruedas (825 y -825 N). Cuando el vehículo gira hacia la derecha, las fuerzas tienden a ser negativas, teniendo un mayor valor absoluto las fuerzas en la rueda izquierda, llegando a picos de -7500 N aproximadamente, pero momentáneos. Cuando gira hacia la izquierda, el pico se produce en la rueda derecha llegando a superar los 5000 N de fuerza lateral.

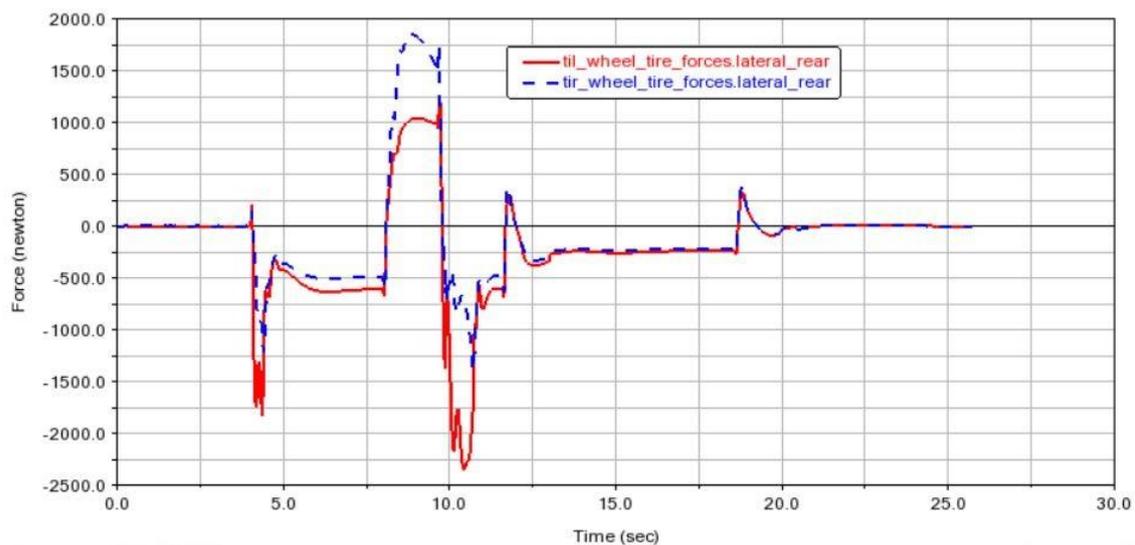


ILUSTRACIÓN 4.59 - FUERZAS LATERALES TRASERAS EN LA TRAYECTORIA

Las fuerzas laterales traseras son nulas en recta y son casi iguales en ambas ruedas, existiendo variaciones cuando se producen giros mayores ya que se puede observar que en giros pequeños esa variación no se aprecia. En la rueda derecha se llega a un pico máximo de 1800 N y en la izquierda de -2300 N aproximadamente, valores más pequeños de los que se producen en las ruedas delanteras.

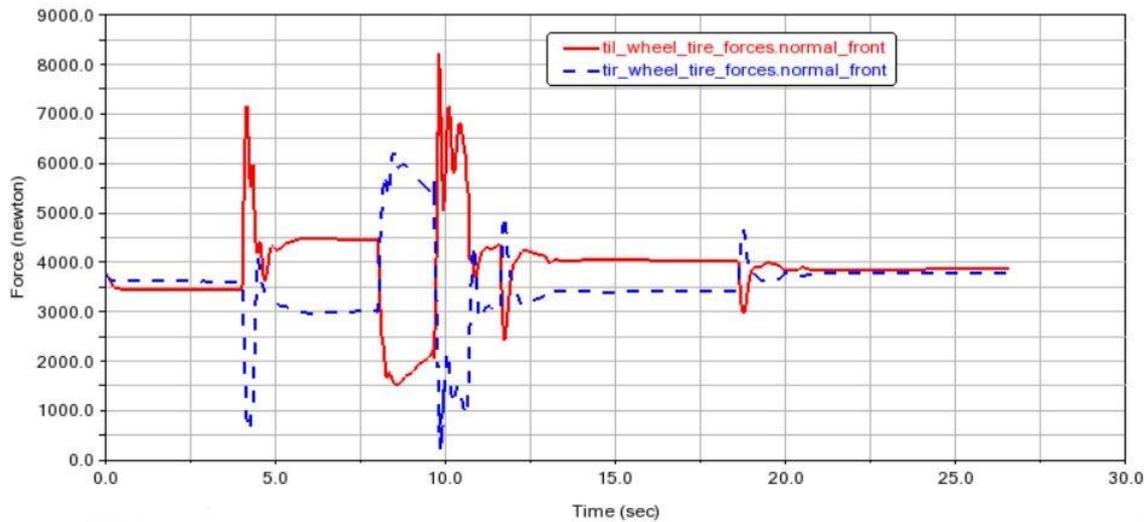


ILUSTRACIÓN 4.60 - FUERZAS NORMALES DELANTERAS EN LA TRAYECTORIA

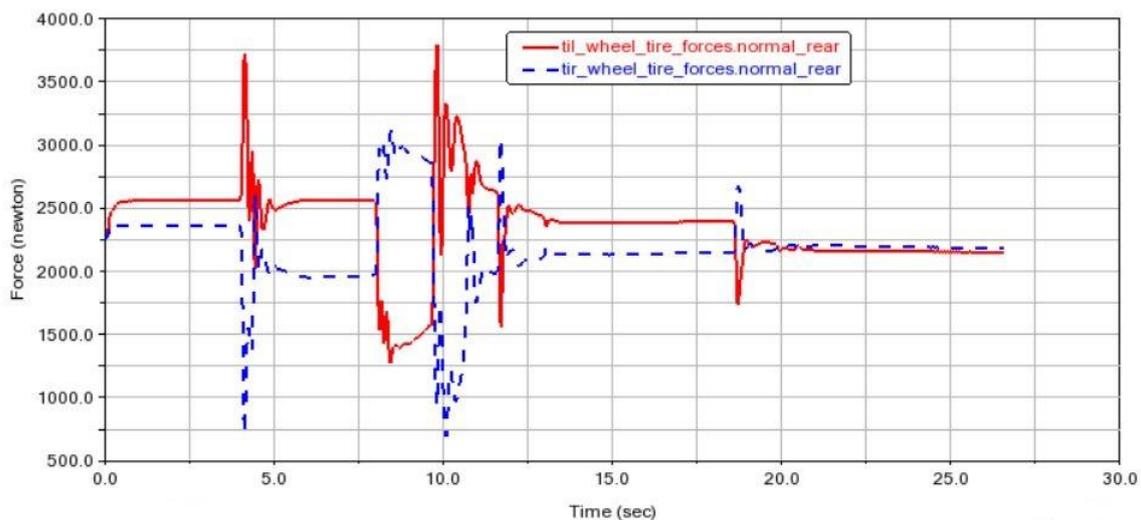


ILUSTRACIÓN 4.61 - FUERZAS NORMALES TRASERAS EN LA TRAYECTORIA

En ambas gráficas anteriores, se muestran las fuerzas normales producidas siendo casi idénticas en cuanto al dibujo, pero teniendo un mayor valor en las ruedas delanteras debido a que estas soportan más peso, llegando a picos de unos 8250 N en la rueda izquierda mientras que en la trasera el máximo son 3800 N aproximadamente. Los picos se producen sobre todo en los giros debido a que el centro de masas se desplaza hacia la rueda exterior por lo que esta rueda será la que soporte más fuerza, así cuando el vehículo gira hacia la derecha, la rueda exterior será la izquierda por tanto aumentará la fuerza en dicha rueda y disminuirá en la rueda derecha como se puede observar en la gráfica.

En la siguiente gráfica se analizará el comportamiento del ángulo de deriva de las ruedas delanteras:

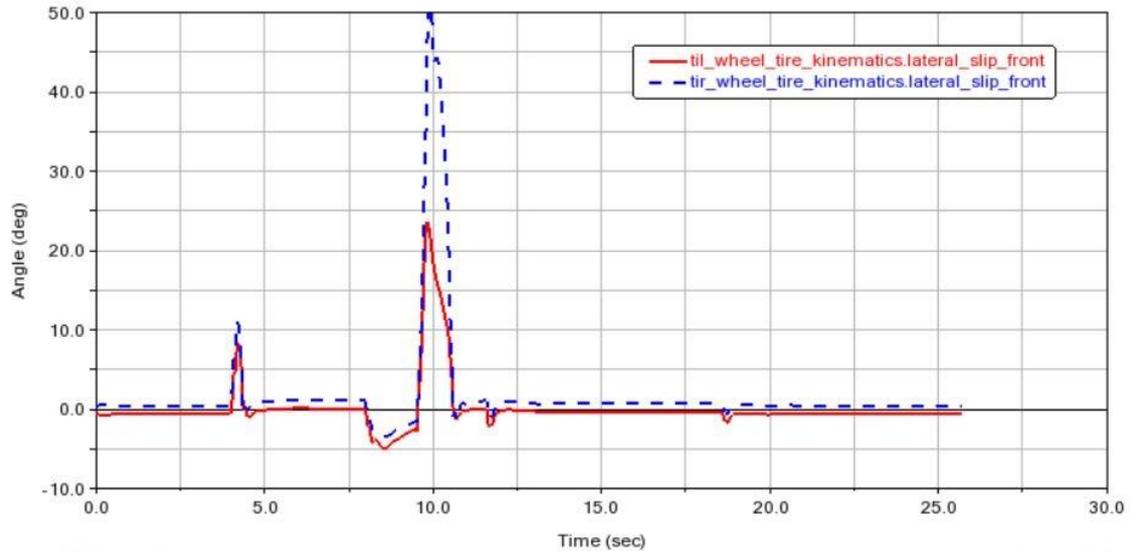


ILUSTRACIÓN 4.62 – ÁNGULO DE DERIVA RUEDAS DELANTERAS EN TRAYECTORIA

Como se puede observar, las ruedas delanteras del vehículo experimentan deriva de forma momentánea en aquellos tramos de la trayectoria donde se producen picos altos en las fuerzas laterales y sobre todo por el segundo 10 que es cuando se produce el giro brusco de izquierda a derecha en pocos segundos. Durante este tramo, se produce un cambio de fuerzas laterales en la rueda izquierda que pasa de estar recibiendo 2500 N a -7500 N y en la rueda derecha de 5500 N a -2500, todo esto hace que la rueda pase a la zona de deslizamiento unos instantes de segundo, produciendo el fenómeno de la deriva, variando incluso 50 grados ese ángulo de deriva. En otras zonas existen también picos pero muy pequeños cuando se producen fuerzas laterales de 2000 N aproximadamente.



5.- CONCLUSIONES Y RESULTADOS

Se han logrado satisfactoriamente los objetivos propuestos a lo largo del proyecto ya que se ha conseguido modelar el vehículo en el programa de la forma más aproximada posible, aunque se han tenido que tomar algunas consideraciones.

Al haber cogido subsistemas ya creados por ADAMS Car y modificarlos para ajustarlos a nuestros intereses, a la hora de hacer el ensamblaje no se han tenido que crear conectores por lo que esta parte se ha simplificado bastante.

Se ha conseguido realizar las simulaciones al vehículo RBK en cuestión y se ha conseguido reproducir mediante el creador de eventos de ADAMS Car una trayectoria establecida con 6 mini-maniobras.

Aparte de ello, se han podido analizar los resultados obtenidos, pero teniendo siempre en cuenta que se tratan de una aproximación al modelo real. Aun así, estas simulaciones y resultados son bastantes útiles para saber y estudiar el comportamiento y viabilidad del vehículo ante un proceso de aceleración, frenado, paso por curva, durante un cambio de carril y mientras realiza una trayectoria establecida dada.

Se ha podido caracterizar el comportamiento lateral de cada neumático analizando la fuerza lateral vs el ángulo de deriva de cada uno de ellos durante la prueba de paso por curva en el que cada rueda tiene una constante diferente porque soportan fuerzas distintas cada una. La rueda que mayor fuerza soporta tiene una constante de rigidez mayor en valor absoluto.

Los resultados más relevantes que se han obtenido han sido su aceleración máxima que puede llegar a producir de 0.2g (1.962 m/s^2) con su potencia de 3.3 kW y un par de 189 Nm en las ruedas. En la prueba de frenado, el vehículo pasa de 32 km/h a 5 km/h en aproximadamente 2.5s recorriendo poco más de 13 m. La aceleración longitudinal producida en los frenos es de $-0.31g$ (-3.041 m/s^2) mantenidos.

Con respecto a las fuerzas producidas en las ruedas, se han sacado las siguientes conclusiones:

- Las fuerzas longitudinales delanteras son ocasionadas por la rodadura del neumático y son prácticamente nulas en todas las pruebas excepto al recorrer la trayectoria establecida que se producen picos de hasta 1000 N pero se producen en instantes de menos de 1 s al realizar los giros.
- Las fuerzas longitudinales traseras aparecen cuando se produce aceleración ya que es un vehículo de tracción trasera, sino son prácticamente irrelevantes. Son iguales tanto en la rueda derecha como izquierda.
- Las fuerzas laterales delanteras tienen un valor fijo inicial igual y de signo contrario en cada rueda de 825 N por los ángulos de estas y la suspensión. Dichas fuerzas varían durante el cambio de dirección y según el sentido de giro que se produzca en el vehículo afectará más a una rueda u otra. Se llegan a producir picos



de 5000 y -7500 N cuando se modifica la dirección y se producen giros durante la circulación por la trayectoria establecida.

- Las fuerzas laterales traseras son prácticamente iguales en ambas ruedas derecha e izquierda hasta un determinado valor (250 N) y aparecen únicamente cuando se produce un giro en el vehículo.
- Las fuerzas normales delanteras tienen un valor fijo inicial de 3750 N, valor mayor que las fuerzas normales traseras que su valor fijo es de 2275 N. Se produce variación de estas al producirse los giros ya que se desplazan los centros de masas, trasladándose la fuerza de la rueda interior, que disminuye, a la rueda exterior que aumenta. Se llegan a picos de 8000 N en las ruedas delanteras.
- A partir de los 1450 N la curva de la deriva vs fuerza lateral comienza levemente a dejar de ser lineal por lo que empieza a aparecer el fenómeno de la deriva pero este se empieza a notar en valores mayores de fuerza lateral como los picos pequeños producidos en la gráfica de la ilustración 4.62 próximos a 2000 N, pero es en los picos de más de 5000 N donde el neumático entra totalmente en la zona de deslizamiento, variando incluso hasta 50 grados ese ángulo de deriva.
- Las constantes de rigidez lateral de las cuatro ruedas deberían de ser iguales, pero no lo son debido a que cada rueda está soportando una fuerza diferente. En este caso la rueda que varía más de las demás es la derecha delantera por la influencia sobre todo de la fuerza normal que tiene que soportar, que es la más grande de todas las ruedas. En el caso de comportarse todas las ruedas de la misma forma, el valor de dicha constante sería de -84903 N.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Costas, Javier. “Historia de los vehículos eléctricos” (2010)
<https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/historia-de-los-coches-electricos>
- [2] <http://electromovilidad.net/historia-del-vehiculo-electrico/>
- [3] Coelho, Fernando. “Historia del coche eléctrico” (2018)
<https://computerhoy.com/noticias/life/historia-del-coche-electrico-75355>
- [4] “Timeline: Life & Death of the Electric Car”, NOW on PBS, Public Broadcasting Service, 9 de junio de 2006
<http://www.pbs.org/now/shows/223/electric-car-timeline.html>
- [5] “World’s first electric car built by Victorian inventor in 1884”
<https://www.telegraph.co.uk/news/newstopics/howaboutthat/5212278/Worlds-first-electric-car-built-by-Victorian-inventor-in-1884.html>
- [6] Wikipedia, “Historia del vehículo eléctrico”
https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_del_veh%C3%ADculo_el%C3%A9ctrico
- [7] Wikipedia, “Le Jamais Contente”
https://es.wikipedia.org/wiki/La_Jamais_Contente
- [8] Wikipedia, “Automóvil eléctrico”
https://es.wikipedia.org/wiki/Autom%C3%B3vil_el%C3%A9ctrico
- [9] Fuller, John. “What is the history of electric cars?” (2009)
<https://auto.howstuffworks.com/fuel-efficiency/hybrid-technology/history-of-electric-cars1.htm>
- [10] Wikipedia, “Tesla, Inc”
https://es.wikipedia.org/wiki/Tesla,_Inc.
- [11] Wikipedia, “Tesla, Inc”
https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla,_Inc.
- [12] Salazar, Mayra. “Tesla Motors, la historia de una idea que genera expectativas” (2018)
<https://www.queeseconomia.site/tesla-motors-la-historia/>
- [13] Martínez, Pepe. “Las marcas de coches más valiosas del mundo 2018” (2018)
<https://es.kantar.com/empresas/marcas/2018/las-marcas-de-coches-m%C3%A1s-valiosas-del-mundo-en-2018/>



- [14] Wikipedia, “Tesla Roadster”
https://es.wikipedia.org/wiki/Tesla_Roadster
- [15] Wikipedia, “Tesla Model S”
https://es.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S
- [16] Wikipedia, “Tesla Model X”
https://es.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_X
- [17] Wikipedia, “Tesla Model 3”
https://es.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_3
- [18] Ruiz, Álvaro. “Tesla lanza una versión más barata del Model 3” (2018)
<https://www.autofacil.es/tesla/model-3/2018/10/22/tesla-lanza-version-barata-model/46965.html>
- [19] Tesla, Inc. <https://www.tesla.com>
- [20] Rodriguez, Brais. “Motor eléctrico versus motor de combustión: par, potencia y eficiencia” (2011)
<https://forococheselectricos.com/2011/11/motor-electrico-versus-motor-de.html>
- [21] Prieto Amaya, Álvaro. “Motores de combustión vs motores eléctricos”(2016)
<https://www.autonocion.com/motores-combustion-diesel-gasolina-vs-electricos-par/>
- [22] Vendrell, Diego. “Coche de combustión vs coche eléctrico” (2017)
<https://www.autonocion.com/motores-combustion-diesel-gasolina-vs-electricos-par/>
- [23] <https://www.baselogica.com/componentes-del-motor-organos-del-movimiento-alternativo/>
- [24] Wikipedia. “Simulación por computadora”
https://es.wikipedia.org/wiki/Simulaci%C3%B3n_por_computadora
- [25] Wikipedia. “Ingeniería asistida por computadora”
https://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_asistida_por_computadora
- [26] Wikipedia. “MSC Adams”
https://es.wikipedia.org/wiki/MS_C_Adams
- [27] Valero, F.; Rubio, F. y Llopis-Albert, Carlos “Assessment of the effect of energy consumption on trajectory improvement for a car-like robot”
- [28] Brake Design and Safety. Limpert, R. SAE, 1999. ISBN 1-56091-915-9



- [29] Mechanical analysis and design. Burr, A.H. Elsevier, 1982. ISBN 044400324X
- [30] Shigley's mechanical engineering desig. Budynas, R. G.; Nisbett, J. K.; Shigley, J. E. McGraw-Hill, 2015. ISBN 0073398209.
- [31] <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/sistema-de-frenos.html>
- [32] <https://www.alke.eu/es/bateria-vehiculo-electrico>
- [33] Palacio Reyna, Edgar. “¿Caja de cambios en motor eléctrico” (2018) <http://firstdrive.com.mx/caja-cambios-motor-electrico/>
- [34] <https://www.monografias.com/trabajos95/sistema-suspension-direccion-y-frenos/sistema-suspension-direccion-y-frenos.shtml>
- [35] <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn73.html>
- [36] Wikipedia. “Suspensión de un automóvil” [https://es.wikipedia.org/wiki/Suspensi%C3%B3n_\(autom%C3%B3vil\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Suspensi%C3%B3n_(autom%C3%B3vil))
- [37] Wikipedia. “Ángulo de caída” https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81ngulo_de_ca%C3%ADda
- [38] [https://iracing.es/tutoriales/210-guia-de-reglajes-iracing#4.2%20Angulo%20de%20ca%C3%ADda%20\(camber\)](https://iracing.es/tutoriales/210-guia-de-reglajes-iracing#4.2%20Angulo%20de%20ca%C3%ADda%20(camber))
- [39] <http://www.grupocircuit.com/nociones-sobre-alineacion-de-la-direccion-de-un-vehiculo-parte-4/>
- [40] Wikipedia. “Suspensión dependiente” https://es.wikipedia.org/wiki/Suspensi%C3%B3n_dependiente
- [41] Wikipedia. “Suspensión independiente” https://es.wikipedia.org/wiki/Suspensi%C3%B3n_independiente
- [42] Wikipedia. “Dirección (automóvil)” [https://es.wikipedia.org/wiki/Direcci%C3%B3n_\(autom%C3%B3vil\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Direcci%C3%B3n_(autom%C3%B3vil))
- [43] Pérez Porto, Julián y Merino, María. Publicado: 2016. Actualizado:2018. <https://definicion.de/carroceria/>
- [44] Centro de investigación de ingeniería mecánica, Universidad Politécnica de Valencia. Dinámica de Vehículos.