



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

*Modelado y control de sistemas de frenado ABS con CarSim*

## **Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Pedro José Solbes Sáiz

**DIRECTORES:** Pablo Falcón Oubiña  
Jose Antonio González Prieto

**CURSO ACADÉMICO:** 2019-2020

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Modelado y control de sistemas de frenado ABS con CarSim*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>de</sub>Vigo



## **RESUMEN**

Los sistemas de frenado antibloqueo, o ABS por sus siglas en inglés, componen uno de los elementos de seguridad más importantes de los vehículos de hoy en día, permitiendo que en momentos en los que hay que realizar una frenada de emergencia, se reduzca la distancia y el tiempo de frenado, y se mantenga la maniobrabilidad del coche en todo momento.

Para que esto se pueda llevar a cabo, existen diversos componentes que controlan el funcionamiento del sistema, entre los cuales se encuentra la ECU (*Electronic Control Unit*), que es el elemento que realiza la función de “cerebro” del sistema, ejerciendo el control sobre los distintos componentes. Para asegurar el buen funcionamiento de este sistema es necesario el diseño de control para los estados de transición y estacionarios. Existen diferentes tipos de control que se pueden aplicar siendo su objetivo optimizar la adherencia entre el vehículo y la carretera y conseguir una frenada eficiente.

En este trabajo se observarán los resultados de poner en práctica distintos tipos de control del vehículo sobre escenarios en línea recta, para así observar los efectos del control sobre el tiempo de frenado y la distancia de frenado, que son los parámetros que pretende reducir el control ABS si solo se tiene en cuenta la componente longitudinal del vehículo.

## **PALABRAS CLAVE**

Control, Modelo, Deslizamiento.



## **AGRADECIMIENTOS**

A mi madre, por ser un referente de lucha diaria en mi vida, irreductible en la adversidad. A mi padre, por ser el faro que ha guiado mi camino hasta donde estoy hoy, transmitiéndome su vocación de servicio a España. A mi hermana, por acompañarme siempre en lo bueno y en lo malo de la mano, hasta el final. A mis abuelos Adolfo y Carmen, y Joaquín e Isabel. A mis tíos y primos. A mis amigos, con mención especial a Javier, Pablo, Paula y Patrick. A todos los profesores que han creído en mis capacidades académicas y personales. A todas las personas que me han apoyado en este derrotero al que, si Dios quiere, le quedan aún muchas millas por recorrer.







## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos .....	7
1.1 Definición de sistema de frenado ABS .....	7
1.2 Historia de los ABS.....	8
1.3 Motivación .....	9
1.4 Objetivos .....	10
1.5 Estructura del trabajo .....	10
2 Estado del arte .....	11
2.1 Sistemas de seguridad en vehículos .....	11
2.2 Dinámica vehicular .....	11
2.2.1 Modelo lateral del vehículo .....	13
2.2.2 Modelo vertical del vehículo .....	14
2.2.3 Modelo longitudinal de vehículo .....	15
2.2.4 Interacción entre el neumático y la carretera .....	20
2.3 Sistemas de frenos ABS .....	22
2.3.1 Funcionamiento de un freno ABS y definición de deslizamiento .....	22
2.3.2 Control de sistemas de freno ABS.....	24
2.3.3 Actuadores de freno .....	25
2.4 Software de simulación .....	27
2.4.1 CarSim .....	27
2.4.2 Matlab / Simulink .....	28
3 Desarrollo .....	31
3.1 Banco de pruebas de CarSim .....	31
3.1.1 Características del vehículo .....	31
3.1.2 Características del entorno.....	33
3.1.3 Entradas y salidas de CARSIM-MATLAB/SIMULINK .....	35
3.2 Modelado longitudinal del vehículo .....	37
3.2.1 Modelado del vehículo en Simulink .....	37
3.3 Diseño del control del vehículo .....	42
3.3.1 Control Todo-Nada.....	42
3.3.2 Controlador PID.....	44

4 RESULTADOS .....	47
4.1 Experimentos por tipo de condiciones y por tipo de control con velocidad fija.....	47
4.1.1 Condiciones perfectas .....	48
4.1.2 Superficie mojada .....	51
4.1.3 Superficie con hielo/nieve .....	54
4.1.4 Superficie cambiante a tramos.....	57
4.1.5 Comentario .....	59
4.2 Experimentos por tipo de control y velocidad y en condiciones fijas.....	61
4.2.1 Experimentos a 50 km/h .....	62
4.2.2 Experimentos a 120 km/h .....	65
4.2.3 Comentario .....	68
5 Conclusiones .....	69
5.1 Lineas futuras .....	70
6 Bibliografía.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Componentes generales de un sistema ABS [1] .....	7
Figura 1-2 Bombardero B-47 de la US Airforce .....	8
Figura 2-1 Sistemas de referencia de un vehículo .....	12
Figura 2-2 cinemática del movimiento lateral .....	14
Figura 2-3 modelo vertical un cuarto de vehículo .....	14
Figura 2-4 Modelo Vertical de un grado de libertad .....	15
Figura 2-5 Representación del modelo de 1/4 de vehículo .....	16
Figura 2-6 Representación del modelo de 1/2 de vehículo .....	17
Figura 2-7 Sistema de referencia de un neumático .....	20
Figura 2-8 Relación entre la fuerza de fricción y el deslizamiento para distintas condiciones de la carretera.....	21
Figura 2-9 diagrama de bloques representativo de un ABS [1] .....	23
Figura 2-10 Sistemas alternativos de frenado ABS.....	25
Figura 2-11 funcionamiento del cilindro de un actuador hidráulico .....	26
Figura 2-12 Mecanismo de cremallera de un actuador mecánico .....	27
Figura 2-13 Pantalla de inicio de CarSim .....	28
Figura 3-1 vehículo seleccionado para realizar las pruebas de CarSim .....	31
Figura 3-2 parámetros dimensionales del vehículo .....	32
Figura 3-3 Parámetros de las ruedas del vehículo .....	33
Figura 3-4 Menu de características del entorno .....	34
Figura 3-5 Opciones añadidas en el subapartado "Miscellaneous 3D Road" .....	34
Figura 3-6 Características de la carretera y su entorno físico .....	35
Figura 3-7 Menú de entradas de CarSim.....	36
Figura 3-8 Menú de salidas de CarSim .....	36
Figura 3-9 modelo de un cuarto de vehículo .....	37
Figura 3-10 Control PID para modelo de CS .....	38
Figura 3-11 Modelo de un cuarto de vehículo modificado .....	39
Figura 3-12 Modelos 1/4 y CS conectados .....	40
Figura 3-13 Modelo matemático del vehículo con control PID.....	42
Figura 3-14 Modelo ABS predeterminado de CarSim.....	43
Figura 3-15 control ABS de CarSim .....	43
Figura 3-16 Respuesta a un escalón unitario de una planta.....	44
Figura 3-17 Curva de respuesta en forma de S .....	45
Figura 3-18 Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional.....	45

Figura 3-19 Oscilación sostenida con periodo  $P_{cr}$  ( $P_{cr}$  se mide en segundos) .....45

Figura 4-1 Esquema de Simulink utilizado para los ensayos .....47

Figura 4-2 Gráficas comparativas de posición a 65 km/h .....61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Parámetros principales del sistema de referencia .....	12
Tabla 2-2 Valores de los parámetros de la fórmula para distintos tipos de superficie .....	21
Tabla 2-3 Valores para los parámetros del modelo Burck-Hardt según el tipo de superficie de carretera.....	22
Tabla 3-1 Parámetros cinemáticos del coche .....	32
Tabla 3-2 Gráficas comparativas del modelo de CarSim y el modelo matemático de Simulink .....	41
Tabla 3-3 Parámetros seleccionados para el modelo matemático .....	41
Tabla 3-4 Parámetros de la fórmula de Pacejka .....	42
Tabla 4-1 Control Todo-Nada en condiciones perfectas a 65 km/h.....	48
Tabla 4-2 Control PID en condiciones perfectas a 65 km/h.....	49
Tabla 4-3 Modelo sin control ABS en condiciones perfectas a 65 km/h.....	50
Tabla 4-4 Control Todo-Nada en condiciones de superficie mojada a 65 km/h.....	51
Tabla 4-5 Control PID en condiciones de superficie mojada a 65 km/h.....	52
Tabla 4-6 Modelo sin control ABS en condiciones de superficie mojada a 65 km/h .....	53
Tabla 4-7 Control Todo-Nada en condiciones de superficie con hielo/nieve a 65 km/h .....	54
Tabla 4-8 Control PID en condiciones de superficie con hielo/nieve a 65 km/h.....	55
Tabla 4-9 Modelo sin control ABS en condiciones de superficie con hielo /nieve a 65 km/h .....	56
Tabla 4-10 Control Todo-Nada en condiciones de superficie interválica a 65 km/h.....	57
Tabla 4-11 Control PID en condiciones de superficie interválica a 65 km/h.....	58
Tabla 4-12 Modelo sin control ABS en condiciones de superficie interválica a 65 km/h .....	59
Tabla 4-13 Control Todo-Nada a 50 km/h .....	62
Tabla 4-14 Control PID a 50 km/h.....	63
Tabla 4-15 Modelo sin control ABS a 50 km/h .....	64
Tabla 4-16 Control Todo-Nada a 120 km/h .....	65
Tabla 4-17 Control PID a 120 km/h.....	66
Tabla 4-18 Modelo sin control ABS a 120 km/h .....	67
Tabla 4-19 Comparativa de tiempos y distancias de frenado a 50 km/h y 120 km/h .....	68
Tabla 4-20 Aceleración de frenado en cada esquema de control .....	68



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Definición de sistema de frenado ABS

El frenado ABS (Antilock Breaking System) es un sistema que nos permite frenar el coche de manera que no se bloqueen las ruedas en ningún momento de la frenada, con el fin de conseguir que el neumático se adhiera casi completamente al asfalto. De esta manera conseguimos mejoras en estabilidad, maniobrabilidad y distancia de frenado. Para que un sistema ABS funcione adecuadamente es necesario conocer la velocidad lineal del conjunto del vehículo y la velocidad lineal de la rueda en el punto de contacto con el asfalto, de esta manera podremos saber si el neumático se está deslizando por la superficie o no. Al valor del deslizamiento de la rueda se le conoce como slip ( $\lambda$ ), y se calcula con la siguiente fórmula (1.1):

$$\lambda = \frac{v - \omega r}{v} \quad (1.1)$$

Donde  $v$  es la velocidad lineal del vehículo,  $\omega$  es la velocidad angular de la rueda y  $r$  el radio de la misma. El valor de  $\lambda$  oscila entre 0 y 1, de tal manera que en condiciones de conducción normales, sin deslizamiento o rodadura pura,  $v = \omega r$ , en cuyo caso  $\lambda = 0$  y en condiciones de frenado extremo se da que  $\omega = 0$  y  $\lambda = 1$  lo cual es perjudicial para la conducción porque aumenta la distancia de frenado y se pierde el control sobre la dirección del vehículo.

El objetivo del sistema ABS es el de manipular la presión con la que se actúa sobre los frenos una vez se alcanza el punto de mayor fricción entre el neumático y el asfalto, de tal manera que si se consigue mantener el mayor coeficiente de fricción posible, el frenado se efectuará de manera controlada y rápida. Para ello, los sistemas ABS están formados generalmente por los siguientes componentes: los frenos del vehículo, sensores que miden la velocidad de cada rueda, una ECU (*Electronic Control Unit*) y una unidad moduladora como podemos ver en la Figura 1-1.

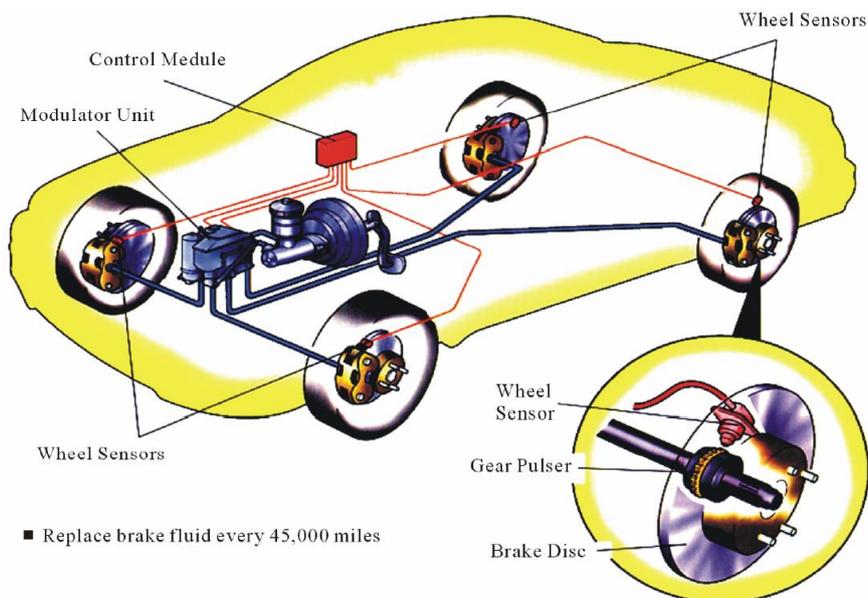


Figura 1-1 Componentes generales de un sistema ABS [1]

Para poder realizar el proceso del frenado con la mayor precisión posible, la ECU controla cada una de las ruedas individualmente recibiendo información a través de los sensores y accionando los actuadores que se encuentran en cada rueda. Hay distintos tipos de actuadores; tradicionalmente el ABS ha utilizado actuadores hidráulicos, pero con los avances tecnológicos de los últimos 20-30 años, se ha invertido mucho en la investigación y el desarrollo de actuadores eléctricos, comúnmente conocidos como “brake-by-wire”, distinguiendo dos tipos de actuadores eléctricos, los actuadores electrohidráulicos (EHB) y los actuadores electromecánicos (EMB) [1].

Los requerimientos mínimos de los sistemas eléctricos en automóviles son los siguientes:

- Seguridad.
- Fiabilidad.
- Disponibilidad.
- Fácil mantenimiento.
- Vida útil acorde con los sistemas modernos.
- Compartimentación.
- Acorde a requerimientos legales.

Mientras que los requerimientos particulares de los ABS eléctricos son:

- Actuadores.
- Sensores.
- Fuente de energía.
- Software.
- Comunicación.

## 1.2 Historia de los ABS

Los sistemas ABS fueron concebidos en la industria ferroviaria a principios del siglo XX. Tras observar los beneficios que podrían traer estos sistemas, fue la industria aeronáutica la que decidió implementarlos en sus aviones para que pudieran frenar con seguridad en pistas de aterrizaje de superficies irregulares y resbaladizas. El primer avión en utilizar esta tecnología fue el bombardero americano B-47 con el fin de evitar reventones de los neumáticos del tren de aterrizaje si estos deslizaban excesivamente sobre el asfalto y de evitar longitudes de frenado muy grandes en pistas resbaladizas con agua o hielo en su superficie.



**Figura 1-2 Bombardero B-47 de la US Airforce**

Posteriormente, el primer automóvil que utilizó ABS fue de la casa Lincoln, que los recicló de un avión francés en 1954. A finales de los 60, Ford, Chrysler y Cadillac ofrecieron contados modelos con ABS. Eran unos sistemas todavía rudimentarios y poco efectivos, de hecho, en la mayoría de casos

aumentaban la distancia de frenado, por lo que eran contraproducentes. A partir de entonces los ABS comenzaron a tener problemas legales en EEUU permitiendo que fueran los países europeos los que tomaran la iniciativa en el desarrollo del sistema durante los siguientes 10-20 años. A finales de los 70, Mercedes y BMW introdujeron los primeros ABS controlados electrónicamente, y a finales de los 80 los ABS ya se ofrecían en la mayoría de coches de alta gama y deportivos, produciéndose en esta década el auténtico auge de la tecnología de los sistemas anti-bloqueo [2].

Los sistemas anti-bloqueo de hoy en día se encuentran en la mayoría de los vehículos y cuentan con complejos ordenadores y elementos que permiten mejorar el frenado al detalle, como por ejemplo la capacidad de controlar por separado cada rueda. Esto ha significado una considerable mejora en la seguridad de la conducción, ya que se puede mantener el control del vehículo en casi todo momento, reduciendo también la distancia de frenado en momentos de extrema necesidad. La evolución y continua mejora de estos sistemas sigue siendo de máxima importancia en los mundos de la automoción y la aeronáutica, ya que la seguridad sigue siendo prioritaria. Se han llevado a cabo numerosos proyectos de marketing que inciden sobre la seguridad del vehículo por el mero hecho de llevar incorporado el ABS, y según un estudio llevado a cabo en EEUU, los usuarios otorgaron el segundo lugar en importancia para la seguridad al ABS, solo por debajo del cinturón de seguridad.

Evans & Gerrish (1996) estudiaron 7 modelos de vehículos en EEUU en los que no se había incorporado el ABS (1991) hasta un año más tarde en los que se introdujo el ABS como equipamiento estándar. Se observó que en pavimento mojado el ABS reducía el riesgo de colisión frontal con otro vehículo en comparación con una colisión por alcance en un 48% (+/-6%). El ABS reducía el riesgo de colisión frontal en un 32% (+/-8%). Aún así, el ABS sí que aumentaba el riesgo de colisión por alcance en un 30% (+/-14%). Por otro lado, en pavimento seco, los vehículos equipados con ABS eran más propensos a colisionar con un vehículo frontalmente con una probabilidad estimada del 23%(+/-15%). Este resultado fue muy inesperado y sugería que aquellos usuarios que disponían de sistema de frenado anti-bloqueo tomaban actitudes de mayor riesgo que las personas que no disponían del mismo.

En 1997 se investigó el riesgo de accidentes fatales en EEUU, descubriendo que la virtud de los sistemas ABS aparece en los accidentes grupales (con más de dos coches involucrados), en los cuales el riesgo se reducía en un 5%. Por otro lado, en accidentes en los que el único involucrado era el vehículo propio, se observó un aumento del riesgo del 17%.

Según los tipos de accidentes hay también numerosos resultados. En 2001 se observó que en función de las condiciones meteorológicas los resultados variaban considerablemente, observando así que las probabilidades de colisionar contra un peatón en condiciones adversas se reducían un 30%, mientras que con condiciones favorables únicamente se reducía un 10%. También se observó que, en condiciones no favorables, las probabilidades de tener un choque frontal se reducían en un 42% mientras que en condiciones favorables solo se reducían un 18%. Por el contrario, no se observó una gran diferencia entre las probabilidades de que ocurriera un accidente lateral en condiciones favorables y no favorables, reduciéndose estas en un 61% y un 69% respectivamente con la implementación de los ABS [3].

Como hemos podido ver finalmente en este apartado, la tecnología ABS no es una invención moderna, sino que por el contrario tiene ya mucho recorrido en la historia de la automoción, observándose grandes beneficios en la seguridad de los aparatos con su implementación, por ello es importante mantener la investigación y tratar de seguir mejorando los sistemas introduciendo nuevas tecnologías y estudios.

### 1.3 Motivación

Los principales puntos que motivan la realización de este trabajo son los siguientes:

- Estudio y comprensión del comportamiento de vehículos de cuatro ruedas.
- Estudio de los sistemas de frenado y los elementos de los que se componen.

- Introducción a la ciencia del control en general, y al control del frenado de un coche en particular.
- Conocer y poner en aplicación el software necesario para la realización del trabajo, en este caso CarSim y Matlab/Simulink.

## 1.4 Objetivos

Los objetivos principales de este trabajo son:

- Diseñar un modelo matemático de un vehículo, simulando el contacto de las ruedas con la superficie de rodadura.
- Comprobar la eficacia del control de los sistemas de frenos en frenadas en recta bajo diferentes condiciones y velocidades iniciales.
- Comprender el funcionamiento del software CarSim y Matlab/Simulink.

Con el fin de cumplir estos objetivos se deberá realizar un estudio exhaustivo de comprensión del software a utilizar, ya que este trabajo se va a sustentar principalmente en el adecuado uso del mismo. También se deben conocer, dentro de la rama de control, los diferentes tipos de control y su diseño fundamental, teniendo en cuenta sus características, para poder así seleccionar adecuadamente los esquemas de control adecuados para el ABS de un vehículo, mirando también hacia la historia de estos sistemas instalados en diferentes plataformas (coches, aviones, motos, etc).

## 1.5 Estructura del trabajo

El trabajo se divide en las siguientes secciones:

- **Estado del arte:** En esta sección se explicarán los conocimientos y avances que se han llevado a cabo en este campo de investigación, destacando los estudios sobre el comportamiento de los vehículos, los sistemas de seguridad existentes en los vehículos a día de hoy, el funcionamiento y los tipos de frenado ABS, y una breve introducción al software de simulación.
- **Desarrollo:** Aquí se hablará del procedimiento seguido para realizar las pruebas en CarSim y Matlab/Simulink, empezando por el diseño de un campo de pruebas para las mismas, posteriormente del modelado matemático del vehículo en Simulink, y por último de los distintos esquemas de control que se pondrán a prueba.
- **Resultados:** Se expondrán los resultados obtenidos de los diferentes ensayos con los diferentes parámetros, realizando breves comentarios sobre los mismos para la fácil comprensión del lector.
- **Conclusiones:** Aquí se expondrá si se han logrado alcanzar los objetivos propuestos al comienzo del trabajo, presentando a su vez las conclusiones obtenidas y una breve recomendación para posibles trabajos futuros.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Sistemas de seguridad en vehículos

Los principales sistemas de seguridad que podemos encontrar en los vehículos (cinturón de seguridad, airbag) comenzaron a aparecer en una época anterior a la de los avances masivos de la digitalización y a lo largo de 80 años de producción de automóviles, la ingeniería de estos se ha mantenido relativamente estática, fundamentándose en un motor de combustión interna, cuatro ruedas, y el uso ya casi intuitivo del acelerador, volante, embrague y freno. Sin embargo, se han hecho grandes avances a lo largo de las últimas dos décadas en cuanto a subsistemas del vehículo se refiere. Hoy en día, un vehículo no se trata de un mero artefacto mecánico, si no que por el contrario, contiene docenas de ordenadores digitales conectados entre si mediante redes internas. Estos ordenadores coordinan y monitorizan mediante sensores los componentes del vehículo, el conductor y los pasajeros. Se estima que un coche tipo berlina moderno contiene alrededor de 100 MB de código binario repartidos entre más de 50 ordenadores independientes – *Electronic Control Units (ECUs)*.

La utilización de estos pequeños ordenadores en vehículos comenzó alrededor de los años 70. En un primer momento no se desarrolló con motivos de maximizar la seguridad del vehículo, sino de controlar más rigurosamente la gasolina que el vehículo consumía, debido principalmente a presiones estatales y económicas por la subida de los precios de la gasolina. Estos ordenadores controlaban la mezcla entre carburante y comburente antes de que se produjera la combustión, mejorando así la eficiencia y minimizando las emisiones. Desde entonces, los ordenadores se han ido introduciendo en la industria del automóvil para controlar casi cualquier aspecto del vehículo, acelerador, transmisión, frenos, pasajeros, emisiones, luces exteriores e interiores, entretenimiento, etc.

Hay tanta cantidad de ECU's en un vehículo que inevitablemente muchos de ellos controlan cosas relacionadas entre si, lo que implica la existencia de redes complejas entre estas unidades. Un ejemplo relacionado con el tema de ABS es la *Electronic Stability Control (ESC)* que monitorizan la velocidad, ángulo de dirección, posición del acelerador y varios acelerómetros, de cada una de las ruedas. El ESC automáticamente modifica el momento generado por el motor sobre el eje y la velocidad de la rueda para aumentar la tracción cuando la dirección del vehículo deja de seguir el ángulo de dirección de las ruedas. Si además se aplican frenos, también deben interactuar con el ABS. Algunos sistemas modernos permiten *Roll Stability Control (RSC)* que permite aplicar frenos, reducir la aceleración y modificar el ángulo de dirección de las ruedas con el objetivo de que el vehículo no vuelque. El *Active Cruise Control (ACC)* es un sistema que se encarga de escanear la carretera por la parte frontal del vehículo y automáticamente ajusta la aceleración del vehículo en función de la presencia de vehículos más lentos que se puedan encontrar por el camino (por ejemplo, el AUDI Q7 automáticamente activa los frenos por completo en el caso de que sea necesario, sin la actuación del usuario). Algunos sistemas incluso proporcionan ajustes “pre-crash” (previos al choque) precargando los frenos y pretensionando los cinturones de seguridad. También, el sistema “Lane Assist” originario de Volkswagen, controla constantemente que el vehículo no se desplace excesivamente hacia los límites de un carril ni se salga de los mismos, siendo capaz incluso de modificar la dirección para cumplir con su cometido. Algunos de estos innovadores sistemas de seguridad controlados por ordenador han resultado ser tan beneficiosos que los fabricantes se han visto obligados a estandarizarlos.

### 2.2 Dinámica vehicular

Un vehículo se mueve por el espacio en los seis grados de libertad propios de los cuerpos espaciales. Según la *SAE (Society of Automotive Engineering)* el sistema de referencia para la dinámica vehicular es el contenido en la Tabla 2-1.

SISTEMA DE REFERENCIA		DESPLAZAMIENTO		ÁNGULO	
O	Centro de Gravedad				
OX	Contenido en el plano longitudinal que contiene a O y es perpendicular al plano de rodadura	X	Longitudinal	$\varphi$	Balanceo
OZ	Perpendicular al plano de rodadura	Z	Vertical	$\psi$	Guiñada
OY	Forma con los anteriores un triedro orientado a derechas	Y	Lateral	$\theta$	Cabeceo

Tabla 2-1 Parámetros principales del sistema de referencia

Una masa puntual centrada en el centro de gravedad de un vehículo tiene un comportamiento dinámicamente equivalente al de la totalidad del vehículo siempre que se asuma que el comportamiento de este es el de un sólido rígido.

Los movimientos de un vehículo pueden definirse respecto a un sistema de referencia cartesiano que puede tener su origen en la masa puntual, es decir, en el centro de gravedad del vehículo, como puede observarse en la Figura 2-1 Sistemas de referencia de un vehículo. Este sistema de referencia debe moverse solidariamente al vehículo en cuestión. En cuanto a los ejes:

- El **eje x** tendrá la dirección longitudinal del automóvil. El sentido será el de avance del mismo. Por lo tanto, el movimiento longitudinal es el movimiento que se describe según este eje.
- El **eje y** será el transversal al vehículo, formando un plano x-y paralelo al plano formado por los puntos de contacto de las ruedas con el suelo. El sentido será como se muestra en la Figura 2-1. El movimiento lateral es por lo tanto el movimiento que se describe según este eje.
- El **eje z** tendrá dirección perpendicular a la calzada y sentido hacia abajo.

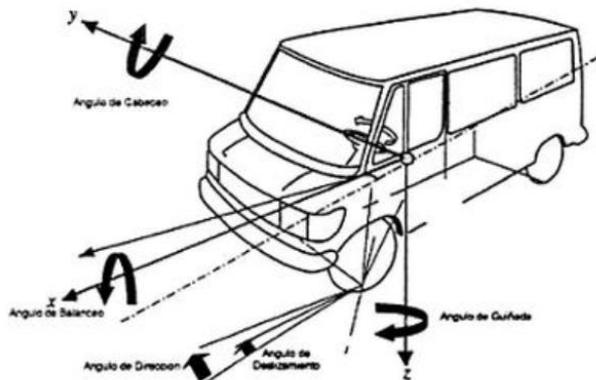


Figura 2-1 Sistemas de referencia de un vehículo

Si se habla de modelos dinámicos, se debe definir el término sistema, que es un conjunto de componentes o módulos que interactúan entre sí a partir de intercambio de energía o información. La definición de sistema es importante para reconocer la integridad del mismo y sus componentes. Un sistema dinámico es aquel que sus variables internas cambian con el tiempo. El análisis de los sistemas dinámicos nos permite conocer el comportamiento del mismo y su evolución en el tiempo.

Un modelo dinámico no es más que una representación aproximada de un sistema que evoluciona con el tiempo. La ventaja de construir un modelo es que nos permite simular el comportamiento de un sistema físico a partir de sus parámetros y señales de entrada con el fin de evaluar ciertas condiciones o cambios sin tener que probarlo en el sistema físico real.

A pesar de que un buen modelo puede dar una representación más fidedigna del comportamiento del coche, desde el punto de vista de control no es aconsejable su uso. Modelos muy complejos de vehículos, que incluyan todos los parámetros y variables, no son los más adecuados para el estudio del control debido a su complejidad y alta no linealidad. Estos modelos pueden que no aporten mucha más información de lo que puede dar un modelo simplificado, orientado para el control del vehículo en una determinada maniobra a estudiar. Es por esto que para estas tareas de control se utilizan modelos dinámicos simplificados que sí poseen las características más importantes del vehículo.

Existen diferentes modelos para la representación del comportamiento de los vehículos como puede ser el modelo lateral, para el estudio del vehículo en el plano de la carretera o los modelos longitudinales, para el estudio de trayectorias rectas y donde se estudian otras variables. También existen modelos más complejos de numerosos grados de libertad que permite analizar de una forma más detallada el comportamiento del vehículo [4].

### 2.2.1 Modelo lateral del vehículo

Los trabajos dentro del ámbito de los modelos laterales de vehículos son de gran importancia a la hora de analizar la seguridad de un vehículo. Tal es así que aproximadamente el 40% de los accidentes fatales que ocurren en las carreteras está relacionado con salidas fuera del carril [5], es decir, despistes que cometen los conductores que propician un descarrilamiento. De esta forma se puede observar la importancia de estudiar los diferentes problemas que pueden acarrear los cambios repentinos de dirección.

Bajo determinadas suposiciones, se puede realizar un modelo cinemático que describa el movimiento lateral del vehículo sin tener en consideración las fuerzas que afectan al movimiento. Este modelo permite la interpretación matemática del movimiento lateral.

Para este modelo consideramos un “modelo bicicleta”, como se muestra en la Figura 2-2. En este modelo, las ruedas izquierda y derecha delanteras se representan como una sola rueda en el punto A. Del mismo modo, las ruedas traseras se representan como una sola rueda central que se encuentra en el punto B. Los ángulos de dirección de las ruedas delanteras y traseras se ven representados por  $\delta_f$  y  $\delta_r$  respectivamente. Como se puede suponer, el modelo es diseñado asumiendo que las ruedas delanteras y traseras pueden variar sus ángulos de dirección, por lo tanto, si lo que se quiere suponer es que únicamente se pueden dirigir las ruedas delanteras, se puede asumir que el valor de  $\delta_r$  es 0. El centro de gravedad se encuentra en el punto C, y las distancias del centro de gravedad a los puntos A y B son  $l_f$  y  $l_r$  respectivamente, por lo que la longitud total del vehículo será  $L = l_f + l_r$ .

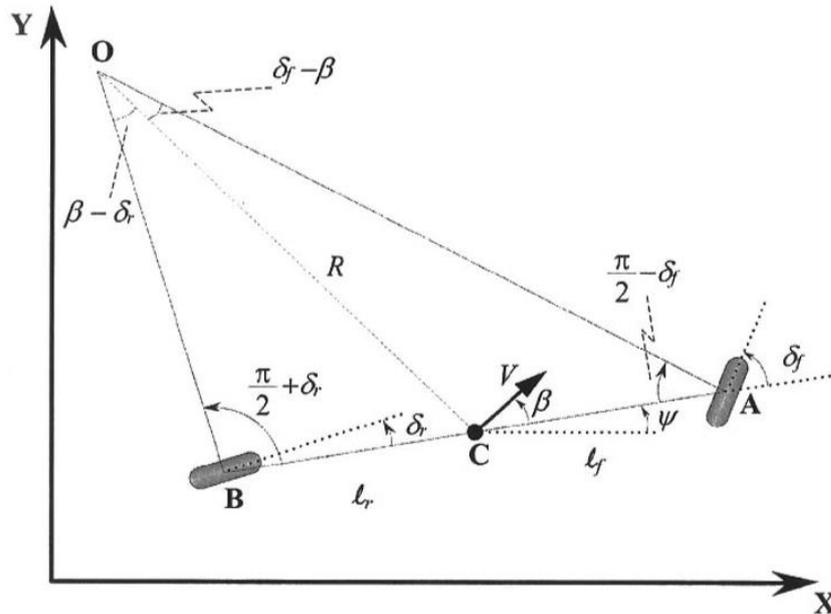


Figura 2-2 cinemática del movimiento lateral

Se asume que el vehículo únicamente tiene vectores de movimiento en el plano. Para describir el movimiento del vehículo se han necesitado tres coordenadas: X, Y y  $\psi$ . (X, Y) son coordenadas inerciales de la posición del centro de gravedad del vehículo, mientras que  $\psi$  es el valor que determina la orientación del vehículo. La velocidad del centro de gravedad se muestra en el vector V con un ángulo  $\beta$  con respecto al eje longitudinal del vehículo. El ángulo  $\beta$  representa también el ángulo de deslizamiento del vehículo.

La mayor suposición empleada en el desarrollo del modelo cinemático es que los vectores de velocidad en los puntos A y B tienen la misma orientación que las ruedas. En otras palabras, se asume que el valor del deslizamiento lateral de las ruedas es cero, lo cual es una suposición razonable para velocidades bajas, ya que la fuerza lateral generada por los neumáticos a velocidades bajas es pequeña [5].

### 2.2.2 Modelo vertical del vehículo

Estos modelos, también considerados como “modelos para el confort”, son aquellos que están basados en el eje vertical del vehículo (eje Z) y su acción tiene lugar en en cualquier combinación de los planos XZ e YZ, como se puede observar en la Figura 2-3:



Figura 2-3 modelo vertical un cuarto de vehículo

Para este tipo de modelos se pueden encontrar dos modelos principales, de un grado de libertad y de dos grados de libertad. El modelo de un grado de libertad es el más sencillo y puede representar la suspensión independiente de un cuarto de vehículo suponiendo despreciables tanto la masa suspendida como la rigidez del neumático.

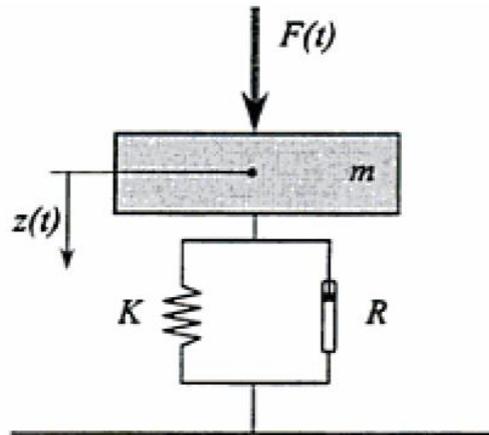


Figura 2-4 Modelo Vertical de un grado de libertad

El elemento consta de una masa  $m$  suspendida por un elemento elástico de rigidez  $K$  y un elemento amortiguador de elasticidad  $R$ . Se considera además una fuerza variable en el tiempo  $F(t)$  que actúa sobre dicha masa, Figura 2-4 Modelo Vertical de un grado de libertad.

Este modelo, aunque extremadamente simplificado, es de aplicación para la determinación del orden de magnitud de la frecuencia natural del movimiento vertical de la masa no suspendida y su adecuación a los mencionados límites del confort del vehículo. Nos ayuda también a apreciar que el vehículo tiene componentes del movimiento en todas las direcciones del espacio, en este caso verticales, y que estas componentes no deben ser ignoradas por el bien de la seguridad de los usuarios [4].

### 2.2.3 Modelo longitudinal de vehículo

En este trabajo tiene especial importancia el uso del modelo longitudinal, que es el modelo que nos aporta mayor fidelidad en el comportamiento del coche durante la maniobra de frenado. Existen varios tipos de modelos, en este trabajo se van a estudiar el modelo  $\frac{1}{4}$  vehículo y el modelo medio vehículo.

#### 2.2.3.1 Modelo longitudinal un cuarto de vehículo

El modelo consiste en una rueda con una masa determinada, si la rueda se mueve, la fuerza de fricción sube debido al contacto neumático-carretera, generando una rotación que impulsa el vehículo hacia delante, en la dirección de avance.

El modelo puede ser descrito con las siguientes ecuaciones:

$$M\dot{v} = -F_x \quad (2.1)$$

$$J\dot{\omega} = rF_x - T_b \quad (2.2)$$

Donde  $M$  es la masa de un cuarto del vehículo,  $v$  es la velocidad del coche-suelo,  $\omega$  es la velocidad angular de la rueda,  $F_x$  es la fuerza de fricción en el neumático,  $F_z$  es la fuerza vertical,  $T_b$  es el torque del actuador (Momento de frenado generado por el actuador),  $r$  es el radio de la rueda y  $J$  es el momento de inercia de la rueda. Con estos parámetros se puede representar el modelo de un cuarto de coche, como se puede ver en la Figura 2-5.

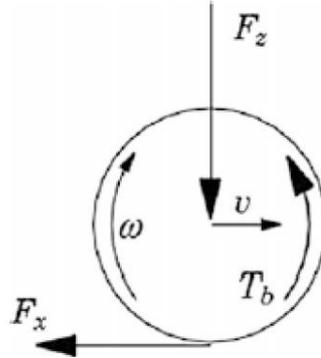


Figura 2-5 Representación del modelo de 1/4 de vehículo

Una de las cosas más importantes para el estudio del freno ABS es el deslizamiento o slip de la rueda, ya que con el sistema ABS se permite que la rueda deslice un mínimo. Este parámetro se define con la ecuación (1.1). Por otro lado, la fuerza en el neumático  $F_x$  depende de la fuerza vertical y el coeficiente de fricción. El coeficiente de fricción a su vez depende del deslizamiento longitudinal ( $\lambda_x$ ), el máximo valor del coeficiente de fricción ( $\mu_h$ ) y del ángulo de giro de las ruedas ( $\alpha$ ). Tal como:

$$F_x = F_z \mu(\lambda_x, \mu_h, \alpha) \quad (2.3)$$

Si  $\alpha$  es despreciable para un escenario de frenado longitudinal, y consecuentemente el deslizamiento longitudinal es más acusado que el deslizamiento lateral. Entonces la fuerza de rozamiento en una maniobra de frenado longitudinal se puede expresar como [6]:

$$F_x = F_z \mu(\lambda_x, \mu_h) \quad (2.4)$$

### 2.2.3.2 Modelo longitudinal de medio vehículo (half car)

El modelo considerado en este apartado es el descrito en el trabajo de Sardarmehni et al. (2014) [7] y Lee et al. [8]. Para el modelo de medio coche no se consideran los efectos del giro de vehículo ni la pérdida aerodinámica para evitar complicar el modelo de estudio. El modelo se centra en explicar el movimiento longitudinal del vehículo, es decir, en la dirección del eje x, como se puede ver en su representación de la Figura 2-6.

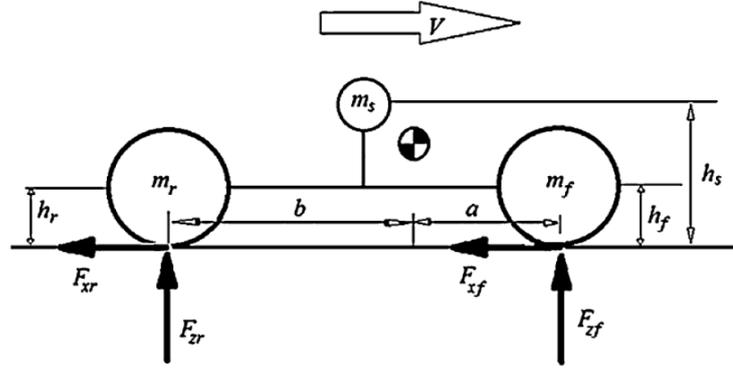


Figura 2-6 Representación del modelo de 1/2 de vehículo

La fuerza de tracción total se representa como:

$$F_{total} = F_{xf} + F_{xr} \quad (2.5)$$

Donde  $F_{xf}$  y  $F_{xr}$  son las fuerzas longitudinales de contacto entre neumático y carretera y se definen como:

$$F_{xf} = \mu(\lambda_f)F_{zf} \quad (2.6)$$

$$F_{xr} = \mu(\lambda_r)F_{zr} \quad (2.7)$$

Siendo  $F_{zf}$  y  $F_{zr}$  las fuerzas normales y  $\mu(\lambda_f)$  y  $\mu(\lambda_r)$  los coeficientes de fricción en los ejes delantero y trasero respectivamente en ambos casos.

La fuerza normal puede ser considerada la diferencia entre distribución de masas del vehículo, la masa transferida del vehículo durante la aceleración y la deceleración.

La fuerza debida asociada a la distribución de masas del vehículo se puede formular como:

$$F_{zf1} = \frac{b}{a+b} M_{total} g \quad (2.8)$$

$$F_{zr1} = \frac{a}{a+b} M_{total} g \quad (2.9)$$

La segunda parte de la fuerza normal en la rueda delantera viene dada por el momento creado en la rueda trasera, que se puede calcular de la siguiente manera:

$$(a+b)F_{zf2} = (m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \dot{v} \quad (2.10)$$

Por lo tanto, la fuerza derivada de la transferencia de masa es:

$$F_{zf2} = (m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \frac{\dot{v}}{a + b} \quad (2.11)$$

Y del mismo modo, la fuerza en la rueda trasera es:

$$F_{zr2} = -(m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \frac{\dot{v}}{a + b} \quad (2.12)$$

Las fuerzas normales en cada una de las ruedas son:

$$F_{zf} = F_{zf1} - F_{zf2} = \frac{b}{a + b} M_{total} g - (m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \frac{\dot{v}}{a + b} \quad (2.13)$$

$$F_{zr} = F_{zr1} - F_{zr2} = \frac{a}{a + b} M_{total} g + (m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \frac{\dot{v}}{a + b} \quad (2.14)$$

Y finalmente, la fuerza total es:

$$F_{total} = \mu(\lambda_f)(M_1 g - M_3 \dot{v}) + \mu(\lambda_r)(M_2 g - M_3 \dot{v}) \quad (2.15)$$

Siendo:

$$M_1 = \frac{b}{a + b} M_{total} \quad (2.16)$$

$$M_2 = \frac{a}{a + b} M_{total} \quad (2.17)$$

$$M_3 = \frac{(m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r)}{a + b} \quad (2.18)$$

Si se usa el modelo de la rueda visto en la Figura 2-5 y se considera que la tracción del vehículo es delantera, el par del motor ( $T_m$ ) solo actúa en esta rueda. Suponiendo que los momentos de inercia se suman en cada uno de los ejes, las ecuaciones del movimiento son:

$$M_{total} \dot{v} = -F_{total} \quad (2.19)$$

$$2J_f \dot{\omega}_f = -T_{bf} + \mu(\lambda_f) F_{zf} r + T_m \quad (2.20)$$

$$2J_r\dot{\omega}_r = -T_{br} + \mu(\lambda_r)F_{zr}r \quad (2.21)$$

Siendo  $r$  el radio de la rueda del coche y  $T_{bf}$  y  $T_{br}$  el par de frenado en el eje delantero y trasero del vehículo.

Se entiende que, en una maniobra de frenado, el par motor ( $T_m$ ) es nulo. Y sustituyendo los valores de  $F_{zf}$  y  $F_{zr}$ :

$$\dot{\omega}_f = \frac{1}{2J_f}(-T_{bf} + \mu(\lambda_f)M_1gr - \mu(\lambda_f)M_3gr\dot{v} + T_m) \quad (2.22)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2J_r}(-T_{br} + \mu(\lambda_r)M_2gr - \mu(\lambda_r)M_3gr\dot{v}) \quad (2.23)$$

En este trabajo se va a controlar el slip (deslizamiento) de las ruedas, por lo tanto, se quiere que se pueda organizar el problema convenientemente de la siguiente manera, como se explica en [7].

$$x_1 = v \quad (2.24)$$

$$x_2 = \lambda_f \quad (2.25)$$

$$x_3 = \lambda_r \quad (2.26)$$

La dinámica del sistema se puede reescribir como:

$$\dot{x}_1 = \dot{v} = f_1 \quad (2.27)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{\lambda}_f = \frac{f_1(1 - x_2) - f_2r + \frac{rT_{bf}}{2J_f}}{v} \quad (2.28)$$

$$\dot{x}_3 = \dot{\lambda}_r = \frac{f_1(1 - x_3) - f_3r + \frac{rT_{br}}{2J_r}}{v} \quad (2.29)$$

Con

$$f_1 = f(x_2, x_3) = -g \frac{(\mu(x_2)M_1 + \mu(x_3)M_2)}{M_{total} - \mu(x_2)M_3 + \mu(x_3)M_3} \quad (2.30)$$

$$f_2 = f(x_2, x_3) = \frac{1}{2J_f}(\mu(x_2)M_1rg - \mu(x_2)M_3rf_1) \quad (2.31)$$

$$f_3 = f(x_2, x_3) = \frac{1}{2J_r}(\mu(x_3)M_2rg - \mu(x_3)M_3rf_1) \quad (2.32)$$

### 2.2.4 Interacción entre el neumático y la carretera

Hay numerosos autores que han modelado la interacción existente entre el neumático y la carretera. Definir esta relación es complicado debido a su naturaleza no lineal y las múltiples variables que intervienen.

Las fuerzas que actúan sobre los neumáticos y provienen de la superficie son las tangenciales y normales en el punto de contacto con la carretera y los momentos que esta origina con respecto a los ejes que van ligados al propio vehículo o al neumático. La SAE recomienda utilizar un sistema de ejes para analizar las componentes de fuerzas y momentos resultantes de la interacción neumático-carretera, como el que se ve en la Figura 2-7 [4].

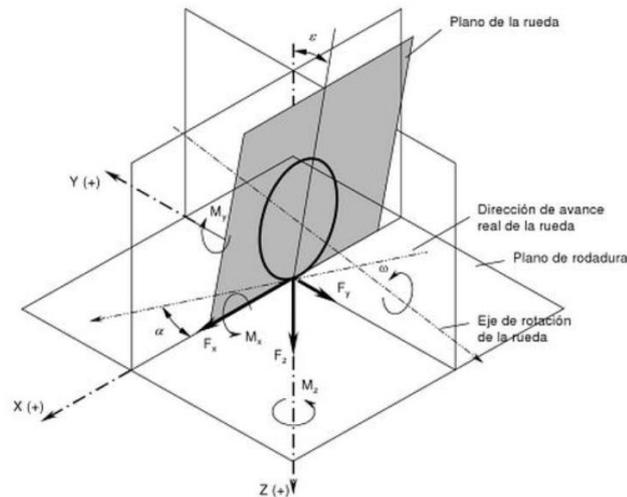


Figura 2-7 Sistema de referencia de un neumático

Se tendrán en cuenta las siguientes definiciones:

- **Centro de la superficie de contacto:** Punto de intersección del plano de la rueda y la proyección de su eje de rotación sobre el plano de la rodadura.
- **Fuerza lateral  $F_y$ :** Fuerza que actúa sobre el neumático como reacción a su interacción con el suelo en la componente del eje Y.
- **Fuerza longitudinal  $F_x$ :** Fuerza que actúa sobre el neumático como reacción a su interacción con el suelo diferenciando entre tracción ( $F_x > 0$ ) y frenado ( $F_x < 0$ ) en la componente del eje X.
- **Fuerza vertical  $F_z$ :** Fuerza que actúa sobre el neumático como reacción a su interacción con el suelo en la componente del eje Z. Debido al peso que el neumático transmite a la superficie de rodadura, este produce una huella de contacto, el aire a presión y la carcasa del neumático son los que soportan el peso asociado a la carga.
- **Momento de vuelco  $M_x$ :** Es el momento de las fuerzas que actúan sobre el neumático respecto al eje X.
- **Momento de resistencia a la rodadura  $M_y$ :** Es el momento de las fuerzas que actúan sobre el neumático respecto al eje Y. La distribución de presiones cuando el neumático entra en contacto con la superficie de rodadura no es simétrica respecto al eje Y, por lo tanto, este momento es el que se opone a la rodadura del neumático sobre el suelo. El centro de presiones y la resultante de las fuerzas verticales quedan desplazadas del eje X hacia delante,

lo cual produce un momento alrededor del eje de su rotación del neumático, que se opone al movimiento.

- **Momento autolineante  $M_z$ :** Es el momento de las fuerzas que actúan sobre el neumático respecto al eje Z.

### 2.2.4.1 Fórmula de Pacejka

El holandés Hans B. Pacejka desarrolló la denominada “fórmula mágica de Pacejka”. En el caso longitudinal puede simplificarse en la siguiente expresión con coeficientes constantes:

$$F_x = F_z D(\mu_h) \sin[C \arctan(B\lambda_x - E(B\lambda_x - \arctan(B\lambda_x)))] \quad (2.33)$$

Donde B, C, D y E son coeficientes dependientes de las características del neumático, de la velocidad del coche, la fuerza de carga vertical y las características de la carretera. La Tabla 2-2 contiene los valores para el valor de pico de  $\mu_h$ , B, C, D, E para distintas condiciones de la carretera a 50 km/h.

La gráfica de la Figura 2-8 muestra la relación entre deslizamiento ( $\lambda$ ) y fuerza de fricción ( $F_x$ ) para los coeficientes de la fórmula de Pacejka en un vehículo con una masa de 1200kg:

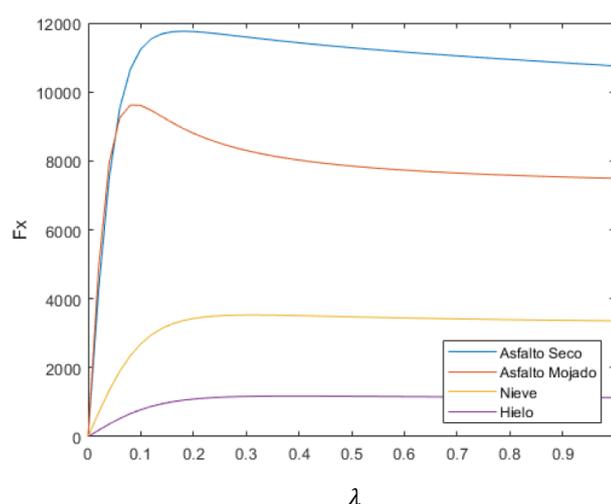


Figura 2-8 Relación entre la fuerza de fricción y el deslizamiento para distintas condiciones de la carretera

Superficie	D = $\mu_h$	B	C	E	Ref
Asfalto seco	1	10	1.9	0.97	0.1
Asfalto mojado	0.82	12	2.3	1	0.08
Nieve	0.3	5	2	1	0.14
Hielo	0.1	4	2	1	0.11

Tabla 2-2 Valores de los parámetros de la fórmula para distintos tipos de superficie

### 2.2.4.2 Modelo de fricción de neumático Burck-Hardt

En varios artículos de investigación se estudia el modelo de Burck-Hardt (1993). En este modelo se establece una relación entre el coeficiente de fricción y el deslizamiento de la rueda mediante la siguiente expresión [2]:

$$\mu(\lambda) = C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda \quad (2.34)$$

Donde  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  son constantes dependientes del estado de la superficie. En la Tabla 2-3 se observan los parámetros característicos según el tipo de carretera.

Superficie	$C_1$	$C_2$	$C_3$
Asfalto seco	1.28	23.99	0.52
Adoquín seco	1.37	6.46	0.67
Hormigón seco	1.19	25.17	0.54
Asfalto mojado	0.86	33.82	0.35
Adoquín mojado	0.4	33.7	0.12
Nieve	0.19	94.13	0.06
Hielo	0.05	306.4	0

Tabla 2-3 Valores para los parámetros del modelo Burck-Hardt según el tipo de superficie de carretera.

### 2.2.4.3 Modelo dinámico simplificado

Con el fin de evitar las no linealidades de los anteriores métodos, existen también modelos lineales que permiten definir la relación entre el slip y el coeficiente de rozamiento de la carretera ( $\lambda$  y  $\mu$  respectivamente). Estas relaciones lineales pueden definirse a través de algún método como un ajuste mínimo cuadrático. La ecuación que se utiliza es la (2.35), siendo los parámetros que se deben conocer para el ajuste  $k$ ,  $a$  y  $b$ . Aunque trabajar con modelos lineales simplifica el problema, se puede decir que este tipo de aproximación no representa con la misma fidelidad la interacción neumático-carretera que los dos modelos anteriormente mencionados.

$$\mu(s) = \frac{ks}{as^2 + bs + 1} \quad (2.35)$$

## 2.3 Sistemas de frenos ABS

### 2.3.1 Funcionamiento de un freno ABS y definición de deslizamiento

El ABS o *Anti-lock braking system* es un Sistema de seguridad del frenado que actualmente es instalado en prácticamente todos los vehículos. Se trata de un sistema de control realimentado que regula el frenado del vehículo para conseguir una deceleración controlada y prevenir el bloqueo de las ruedas. De esta forma, se mantiene la estabilidad y la controlabilidad del vehículo durante la frenada. Bloquear las ruedas conseguiría frenar el coche pero anularía casi por completo la maniobrabilidad del vehículo para sortear algún contacto.

El funcionamiento de un sistema ABS puede estar fundamentado en distintos modelos de funcionamiento, dado que existen varios tipos de sistemas ABS como pudimos ver en la introducción. Por ejemplo, tenemos los ABS hidráulicos cuyo patrón de funcionamiento es de “morder y soltar” para mantener el deslizamiento bajo mínimos con el mayor agarre al asfalto posible. Este sistema ha evolucionado hacia sistemas más complejos controlados electrónicamente que ajustan la presión de las pastillas de frenos para que esta frene lo suficiente sin que se bloquee la rueda. En cualquiera de los casos, los sistemas ABS de hoy en día se ayudan de sensores, ordenadores y actuadores con el fin de mantener la maniobrabilidad del coche y reducir la distancia de frenado en el caso de una frenada de emergencia.

El principal problema que aparece para el diseño del control de un ABS es su naturaleza no lineal y la incertidumbre natural del problema, ya que cuenta con muchas incógnitas que pueden no conocerse cuando primeramente surge la necesidad de utilizar el sistema y deben calcularse con mucha rapidez para que pueda emplearse con eficacia. Los ABS están diseñados alrededor de los sistemas hidráulicos, sensores y sistemas electrónicos de control. Estos sistemas son dependientes los unos de los otros y los diferentes componentes son intercambiables empleando cambios mínimos en el software de control.

El sensor de la rueda alimenta de datos de velocidad de rotación a la ECU (Electronic Control Unit), el cual, en función de una señal del software de control puede dar órdenes al actuador del freno. En ese momento, la unidad de control del actuador controla el actuador basándose en las directrices que recibe de la ECU. El fin último del control se basa en el objetivo de evitar que las ruedas se bloqueen y mantener un nivel óptimo de agarre entre el neumático y la superficie. Esta tarea se complica cuando tenemos en cuenta que la curva agarre-deslizamiento varía en función del vehículo, el neumático y cambios en la superficie de rodadura. En el diagrama de bloques de la Figura 2-9 se muestran los componentes de los que se compone un sistema ABS [1].

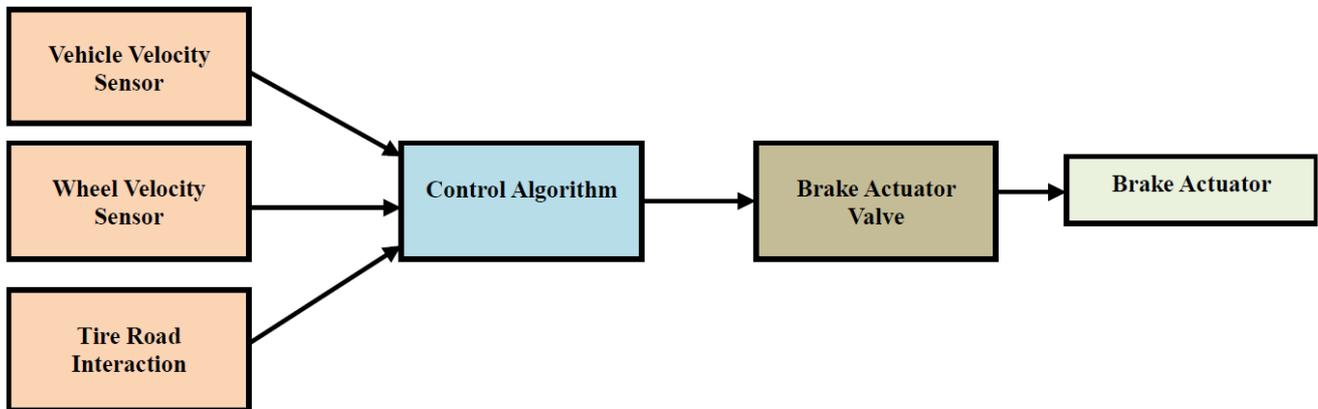


Figura 2-9 diagrama de bloques representativo de un ABS [1]

Los objetivos de diseño del sistema ABS son principalmente:

- Conseguir la mínima distancia de frenado.
- Mantener la estabilidad y controlabilidad del vehículo.

Solución de diseño: Desarrollar un sistema que regule rápidamente la fuerza del freno con:

- Mantener el porcentaje de slip para maximizar la fuerza de frenado.
- Permitir al vehículo girar previniendo el deslizamiento.

## 2.3.2 Control de sistemas de freno ABS

### 2.3.2.1 Controladores todo-nada

Este esquema de control se utiliza para casos en los que la precisión de la planta no es de vital importancia para su funcionamiento. Se basa en la comparación de los valores medidos con un valor predeterminado, revisando que la variable de proceso esté por encima o por debajo de un valor límite. El elemento diferenciador de este esquema de control es que la señal de control es de “totalmente on” o “totalmente off” (0 ó 1), esto es, sin estados intermedios. Este tipo de controladores se utilizan por ejemplo en los termostatos, ya que no requieren de un tiempo de reacción muy bajo y se pueden permitir la fluctuación de la variable de proceso.

Como podemos observar en la Figura 3-15 de este trabajo, el controlador utilizado por CarSim para el control de su sistema ABS es de tipo Todo-Nada, con la salvedad de que utiliza dos valores de referencia para mantener el valor de la variable del proceso dentro de esos dos límites. Evidentemente, este hará que la respuesta del control se haga más lenta (debido a la sobreoscilación de la variable de proceso) y menos precisa, lo cual desemboca en que la adherencia del neumático a la carretera no sea la óptima.

A pesar de esto, los controladores Todo-Nada tienen algunas ventajas. Por ejemplo, son fáciles de implementar en un vehículo, y como para los sistemas ABS la precisión no es relevante a la hora de aplicar un par de frenado sobre la rueda, no supondría un grave problema implementar este esquema de control con el fin de evitar el bloqueo de los neumáticos sobre el asfalto.

### 2.3.2.2 Controladores PID

Los controladores PID (*Proportional-Integral-Derivative*) tienen una gran importancia industrial, de tal forma que aproximadamente más de la mitad de los controladores utilizados en la industria a día de hoy tienen un esquema de control PID o PID modificado, ya que ofrecen la solución más simple y eficiente a los problemas de control. Esto es un hecho sorprendente si tenemos en cuenta que los controladores PID fueron diseñados por primera vez en 1910 para la industria naval, década en la que adquirieron una gran popularidad. Hoy en día, con los avances en la tecnología digital, la ciencia del control automático ofrece un amplio abanico de esquemas de control para diferentes finalidades. La gran utilidad del PID es la capacidad de poder implementarlo en procesos desconocidos, realizando mínimos ajustes cuando se requiere.

El objetivo fundamental de un controlador es el de realizar una comparación entre un punto de consigna o referencia, y una medida o variable controlada. La diferencia entre la medida y el punto de consigna es lo que se considera el error del controlador, y este error es el que debe ser constantemente corregido para que la medida se mantenga siempre cercana al valor de referencia. Para comprender cómo funciona un controlador PID, es necesario tratar de explicar qué función realiza cada uno de los parámetros del esquema, es decir, los parámetros proporcional, integral y derivativo:

- **Proporcional:** Es aquel controlador en el que la señal de salida es proporcional al error, es decir, a la diferencia entre el valor actual de la medida controlada y el punto de consigna.
- **Integral:** el término integral es proporcional a la integral del error. Lo que provoca que el controlador tenga en cuenta los valores históricos, como una cierta memoria, de la señal de error.
- **Derivativo:** el término derivativo es proporcional a la derivada de error.

### 2.3.2.3 Controladores avanzados

Dentro de los estudios de los esquemas de controles para sistemas ABS, existen también una gran variedad de los denominados controladores avanzados, que siguen otros esquemas alternativos y de mayor complejidad que los vistos en los apartados anteriores. Esto es debido a la complejidad del problema. Muchos investigadores han diseñado controladores teniendo en cuenta los grandes inconvenientes para la solución del problema, como por ejemplo, la complejidad de los sensores que

miden la velocidad lineal de las ruedas en el punto de contacto con la superficie de rodadura, o los sensores que miden la velocidad del conjunto. La mayoría de estos controladores, aunque no son del tipo PID, sí se basan en esta modalidad de esquemas de control para el campo de los sistemas de frenado anti-bloqueo, en la Figura 2-10 podemos observar algunos [1]:

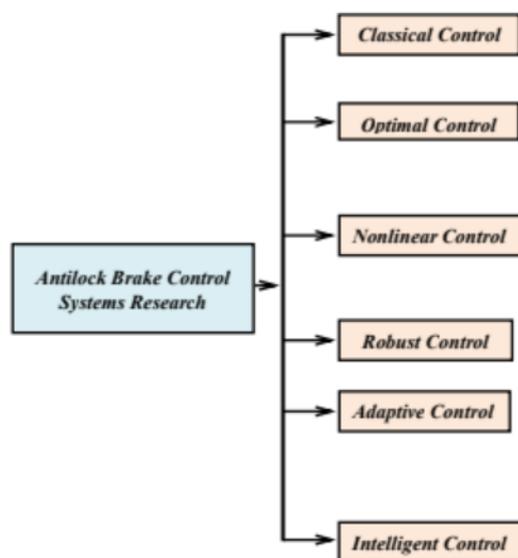


Figura 2-10 Sistemas alternativos de frenado ABS

En este trabajo no se tendrán en cuenta para su estudio este tipo de controladores, ya que, aunque llevando a cabo una solución más a medida del problema por su naturaleza no lineal, basta con comprender el funcionamiento de los controladores PID para dar con una solución básica al problema.

### 2.3.3 Actuadores de freno

#### 2.3.3.1 Actuadores neumáticos

Un actuador neumático es aquel actuador que es capaz de transformar energía de un elemento con gas a presión en movimiento. Los actuadores neumáticos son capaces de generar movimiento lineal y rotatorio, siendo normalmente alimentados por un compresor eléctrico.

Los actuadores neumáticos son en general componentes muy simples conformados usualmente por un cilindro o cámara en la que el aire, un gas o una combinación de ambos se comprime y expande a voluntad del usuario. Conforme el gas se expande dentro de la cámara, un pistón se mueve en la dirección de su eje creando así una fuerza lineal. Su posición inicial se recupera mediante otro fluido en estado líquido o gaseoso que se introduce en el cilindro por el lado opuesto al anterior.

Los actuadores neumáticos son útiles en zonas con temperaturas extremas. Un rango de temperaturas típico de un actuador neumático sería de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ . En términos de seguridad, este tipo de componentes no utilizan materiales peligrosos para funcionar, ya que utilizan generalmente aire. En términos de precio, los actuadores neumáticos son más baratos que los hidráulicos y los eléctricos, además de que requieren menos mantenimiento y son muy ligeros.

#### 2.3.3.2 Actuadores hidráulicos

Los actuadores hidráulicos están diseñados para transmitir fuerzas muy elevadas. Un actuador hidráulico puede producir fuerzas hasta 25 veces superiores a las de un actuador neumático del mismo tamaño, al igual que es capaz de soportar presiones de hasta 4000 psi. Este tipo de actuadores son capaces

de mantener la fuerza y el torque constantes durante tiempo indefinido sin la necesidad de que una bomba introduzca más fluido en el sistema para mantener una presión constante, gracias a la propiedad de incompresibilidad de los fluidos. También es capaz de generar movimiento lineal o rotatorio.

El funcionamiento de los actuadores hidráulicos es muy similar al de los actuadores neumáticos, habiendo también gran variedad de diseños. La Figura 2-11 nos muestra el cilindro de un actuador hidráulico de pistón.

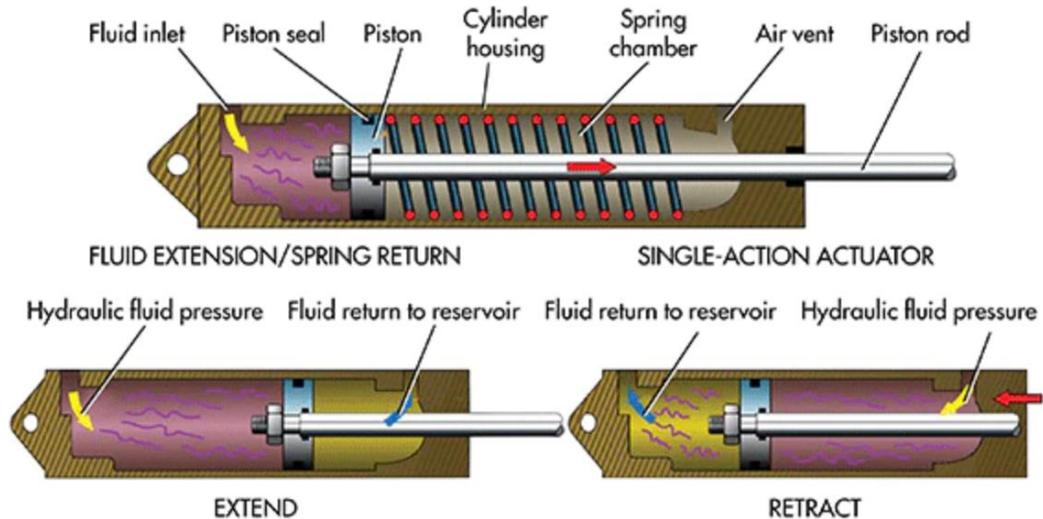


Figura 2-11 funcionamiento del cilindro de un actuador hidráulico

### 2.3.3.3 Actuadores eléctricos

Los actuadores eléctricos pueden generar fuerza o momento de diversas formas gracias a los diferentes posibles diseños. Principalmente podemos encontrar los siguientes dos tipos de actuadores: Actuadores electromecánicos que se pueden emplear para alimentar un motor que pueda convertir energía eléctrica en momento mecánico; Actuadores electrohidráulicos en los que un motor eléctrico sigue siendo el principal generador de movimiento pero a la vez aporta torque para operar un acumulador hidráulico que puede emplearse para transmitir fuerza de la misma forma que puede hacerlo un motor diesel que se utiliza en maquinaria pesada.

Las gran ventaja de los actuadores eléctricos es la precisión con la que trabajan. Un actuador eléctrico tiene una precisión aproximada de  $\pm 8,001 \mu m$  con una repetibilidad de  $1 \mu m$ . Puede haber distintos actuadores conectados en una red y ofrecen datos relativos al estado del componente para tareas de diagnóstico y mantenimiento.

### 2.3.3.4 Actuadores mecánicos

Los actuadores mecánicos son aquellos que son capaces de transformar un tipo de movimiento como por ejemplo movimiento rotatorio, en un movimiento de otro tipo como por ejemplo el lineal. Un buen ejemplo es un mecanismo de cremallera, en la que una rueda dentada (movimiento rotatorio) engrana con una barra dentada para pasar de un movimiento rotatorio (rueda dentada) a un movimiento lineal (cremallera). El principio de funcionamiento de los actuadores mecánicos es el de variar los tipos de movimientos mediante componentes como engranajes, railes, poleas, cadenas, etc.



Figura 2-12 Mecanismo de cremallera de un actuador mecánico

## 2.4 Software de simulación

En la actualidad hay varios softwares de simulación comerciales como son veDyna, DynaCar, Matlab Simscape, Carsim, etc. Este trabajo se ha centrado en la utilización Carsim y Matlab principalmente, por estar disponibles en el centro de estudios. A continuación, se detallarán las características de estos programas informáticos.

### 2.4.1 CarSim

CarSim es un software de simulación diseñado por la empresa Mechanical Simulation que nos permite predecir el comportamiento de los vehículos en diferentes condiciones programables. Este software es utilizado por unas 30 empresas dedicadas a la producción de automóviles (Honda, Toyota, General Motors, Ford, etc) y por más de 140 laboratorios de investigación y universidades de todo el mundo.

Los modelos matemáticos utilizados en CarSim permiten a los ingenieros observar y evaluar con seguridad, y más rápido, los resultados de una prueba simulada en el software, otorgando unos resultados similares a los que se podrían dar en un ensayo real. Estos ensayos simulados son utilizados por muchas empresas para probar diseños de vehículos que todavía no han sido construidos. Los resultados de una simulación de CarSim pueden visualizarse a través de video, gráficas, tablas e incluso pueden exportarse a otros programas (Matlab) para realizar una evaluación más detallada. Los modelos imitan fielmente el comportamiento de los sistemas del coche, simulando a su vez los efectos de la interacción neumático-superficie y como esta interacción actúa sobre la suspensión y esta al chasis. Estos modelos han sido repetidamente validados por empresas productoras de vehículos por la capacidad de evaluar la maniobrabilidad, la estabilidad, el frenado y la aceleración. Por el contrario, el software no es capaz de evaluar los detalles necesarios para determinar la durabilidad, la fatiga o vibraciones de altas frecuencias.

Las principales utilidades de CarSim son:

- Llevar a cabo pruebas sobre un modelo con anterioridad a la construcción de un prototipo, o para mejoras de vehículos ya existentes.
- Pruebas de sistemas de control avanzado para frenos, estabilidad, tracción, etc. Para este tipo de cometidos, CasSim nos permite utilizar software externo de programas como Simulink (Mathworks), LabVIEW (National Instruments), Active (SolidThinking) o código personalizado (MATLAB, Visual Basic, C/C++, etc).
- Investigadores y otros usuarios utilizan los modelos matemáticos de CarSim para simuladores de conducción en un amplio rango de utilidades, desde simuladores “low-cost” controlados

mediante controladores de videojuegos hasta simuladores de movimiento gran escala como el Toyota Simulator.

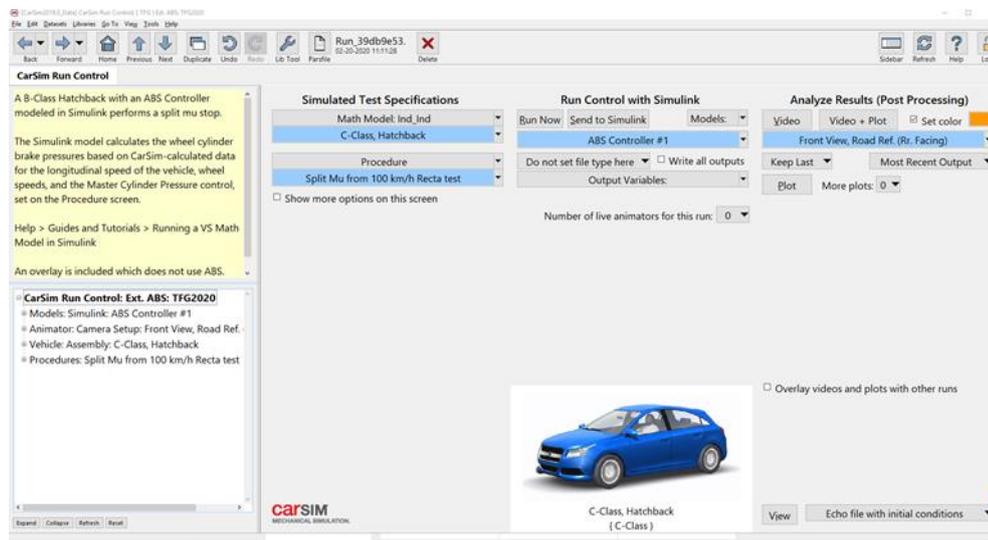


Figura 2-13 Pantalla de inicio de CarSim

Como se puede apreciar en la Figura 2-13, el software CarSim divide los parámetros de simulación en tres grupos, que son las tres columnas que se pueden observar:

- **Simulated Test Specifications:** Es la parte que controla todos los parámetros de simulación, es decir, los parámetros del vehículo como la masa del conjunto, de las ruedas, la longitud del vehículo, la altura, etc, y los parámetros del escenario en el que se realiza la simulación, en este caso, la carretera, el número de curvas y con qué radio, el coeficiente de rozamiento de la superficie, el entorno meteorológico...
- **Run Control with Simulink:** En esta columna se encuentra todo lo relacionado con las entradas y salidas que nos ofrece la simulación, siendo también aquí donde se encuentra el accionador para que se lleve a cabo la simulación. Esta parte de CarSim es la que nos permite sacar los parámetros de CarSim a otros programas para su mejor manipulación o comprensión de los resultados.
- **Analyze results (Post Processing):** Es la parte de CarSim en la que se controla la visualización del vehículo en las pruebas que le han sido asignadas.

### 2.4.2 Matlab / Simulink

Matlab es un entorno de computación numérico con un lenguaje de programación propio, creado por la compañía MathWorks, se encuentra disponible en los sistemas operativos más empleados, como por ejemplo Unix, Windows, macOS y GNU/Linux. Matlab permite manipular fácilmente matrices, dibujar funciones, implementar algoritmos, crear interfaces de usuario y comunicarse con programas independientes de Matlab con un lenguaje de programación distinto al propio.

Por otro lado, Simulink es un entorno gráfico interactivo utilizado para el modelado, análisis y simulación de una gran variedad de sistemas dinámicos digitales, analógicos e híbridos a través de la utilización de diagramas de bloques. Es un programa integrado dentro de Matlab.

Ventajas del uso de Matlab/Simulink

- Rapidez en el desarrollo de los algoritmos.
- Facilidad de importación y exportación de datos.
- Sencillez en la interpretación de los algoritmos.
- Es un estándar para la simulación en la ingeniería.



## 3 DESARROLLO

### 3.1 Banco de pruebas de CarSim

El banco de pruebas supone el entorno en el que se van a efectuar las pruebas del modelo propuesto para el TFG. Es por ello que crear un banco de pruebas adecuado resulta de gran importancia, ya que hacerlo de una forma en la que haya variedad de escenarios y situaciones resultará clave para determinar la robustez y fiabilidad del control diseñado. Para este trabajo hemos decidido crear 4 escenarios distintos, cada uno de los cuales pone a prueba el control de diferentes formas. Estos escenarios son fundamentalmente una recta sin inclinación con una superficie de rodadura en diferentes estados y por lo tanto diferentes coeficientes de rozamiento. Estos cuatro son:

- **Condiciones perfectas:** el coeficiente de rozamiento es 1.
- **Asfalto con nieve:** el coeficiente de rozamiento es de 0,3.
- **Asfalto con lluvia:** el coeficiente de rozamiento es de 0,65.
- **Alternativo (a tramos):** El coeficiente de rozamiento se alterna cada 4 metros de tal forma que el primer intervalo tiene un coeficiente de rozamiento de 1 (condiciones perfectas) y el segundo tiene un coeficiente de rozamiento de 0,3. Esta prueba resulta útil para determinar el tiempo que tarda el control en reaccionar ante cambios bruscos y repentinos del slip.

Estos cuatro escenarios son válidos para validar la fiabilidad del control de tal forma que se pueda apreciar su comportamiento en los diferentes casos.

#### 3.1.1 Características del vehículo

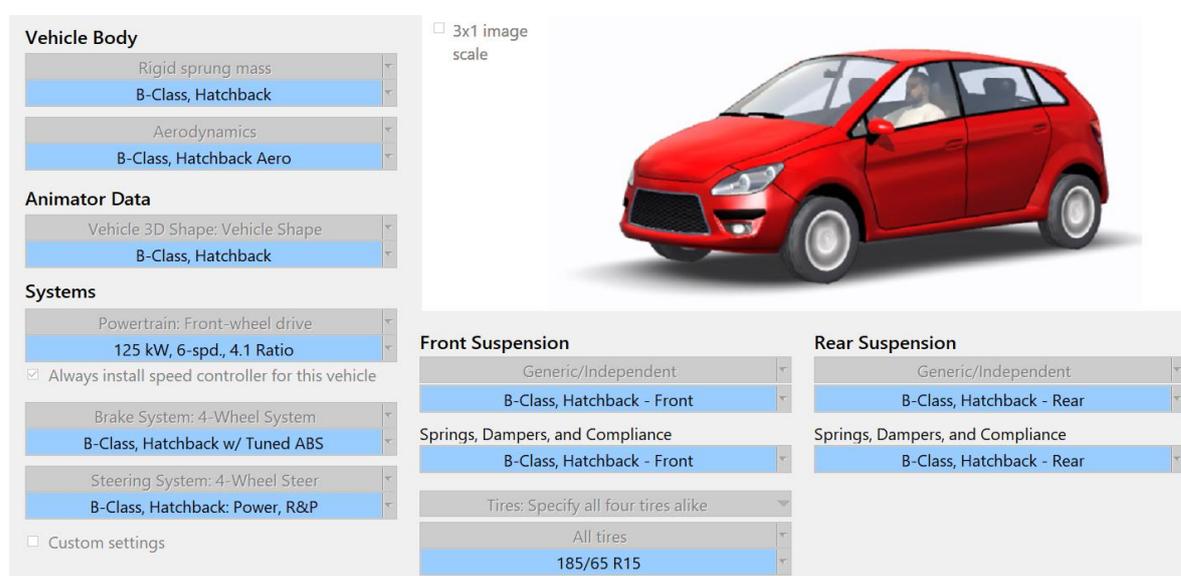


Figura 3-1 vehículo seleccionado para realizar las pruebas de CarSim

El vehículo a utilizar en las simulaciones es de gran importancia para los resultados. Para este trabajo se ha decidido utilizar un vehículo como el que se puede apreciar en la imagen de la Figura 3-1. Como se puede ver se ha seleccionado un modelo B-Class, Hatchback, el cuál se trata de un vehículo ligero con respecto al resto de vehículos.

Los parámetros dimensionales del coche se muestran en la Figura 3-2:

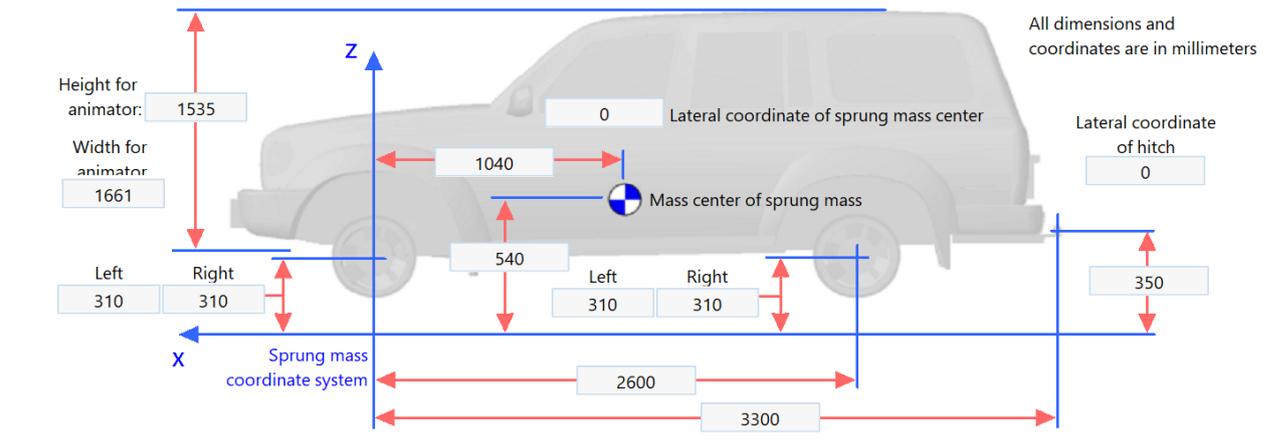


Figura 3-2 parámetros dimensionales del vehículo

Como se puede ver en la imagen, todas las dimensiones que se expresan en ella se miden en milímetros. También es de importancia considerar los parámetros de la Tabla 3-1:

Simbolo	Descripción	Valor
m	Masa total	1190 kg
$m_s$	Masa suspendida	1110 kg
$I_{xx}$	Momento de inercia del vehículo al balanceo	440,6 kg/m <sup>2</sup>
$I_{zz}$	Momento de inercia del vehículo a la guiñada	1343,1 kg/m <sup>2</sup>

Tabla 3-1 Parámetros cinemáticos del coche

### 3.1.1.1 Modelo neumático-carretera utilizado por CarSim

Una vez conocemos los parámetros generales del vehículo, es también de gran importancia para este trabajo conocer los datos particulares de las ruedas, los cuales se muestran en la Figura 3-3 Parámetros de las ruedas del vehículo:

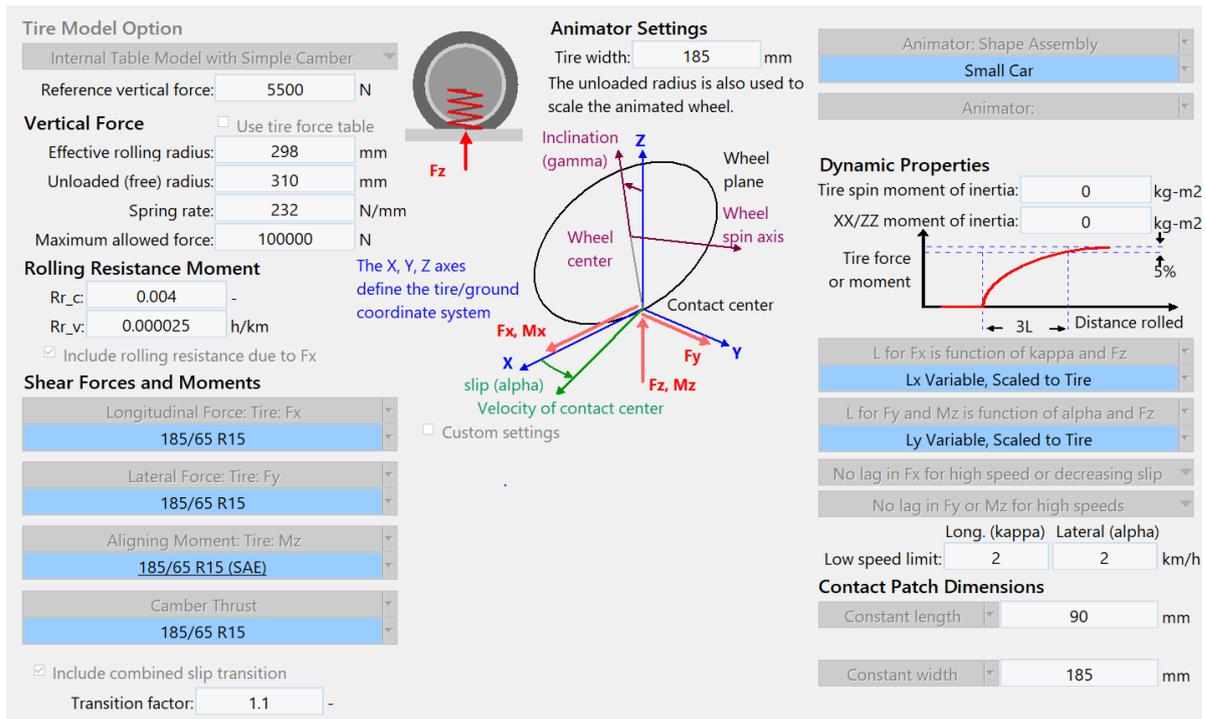


Figura 3-3 Parámetros de las ruedas del vehículo

De los cuales son de gran importancia los valores del radio de las ruedas, ya que como recordamos de la fórmula del slip, es necesario para su cálculo.

### 3.1.2 Características del entorno

Las características del entorno de CarSim son las que definen las condiciones meteorológicas y las condiciones del asfalto cuando se haga la prueba con el coche. En este trabajo la importancia del entorno reside en la variación del coeficiente de rozamiento, ya que el control del ABS depende en gran medida de este factor. En la Figura 3-4 visualizamos el menú de las características del entorno:



Figura 3-4 Menu de características del entorno

En este menú también se pueden definir parámetros del coche como la presión máxima de los actuadores de los frenos, que como se puede ver en este caso es de 15 MPa. También se puede observar el valor de la velocidad inicial del vehículo, que aunque se cambiará para realizar pruebas a diferentes velocidades, en esta figura es de 65 km/h. Dentro del apartado “Additional Data” se encuentra el subapartado “Miscellaneous: 3D Road”, dentro de este subapartado se pueden modificar las características de la carretera y su entorno físico.

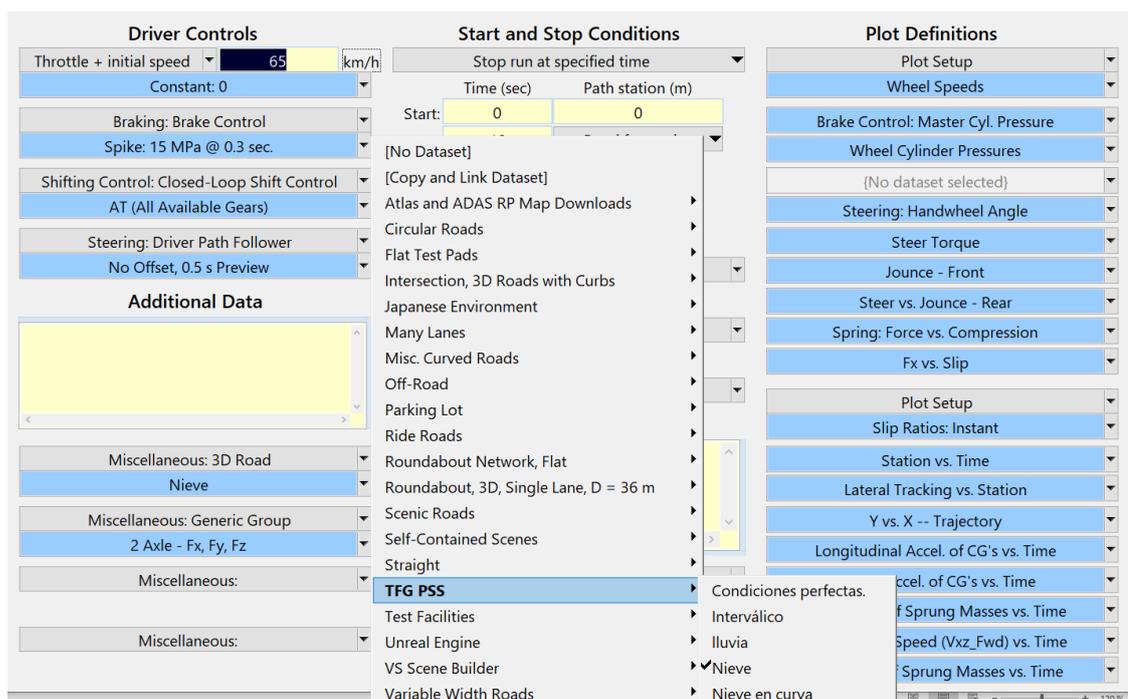


Figura 3-5 Opciones añadidas en el subapartado "Miscellaneous 3D Road"

En la Figura 3-6 se puede observar cómo se ha insertado un modo llamado “TFG PSS” en el cual se han instalado las diferentes condiciones del entorno necesarias para realizar las pruebas de este trabajo.

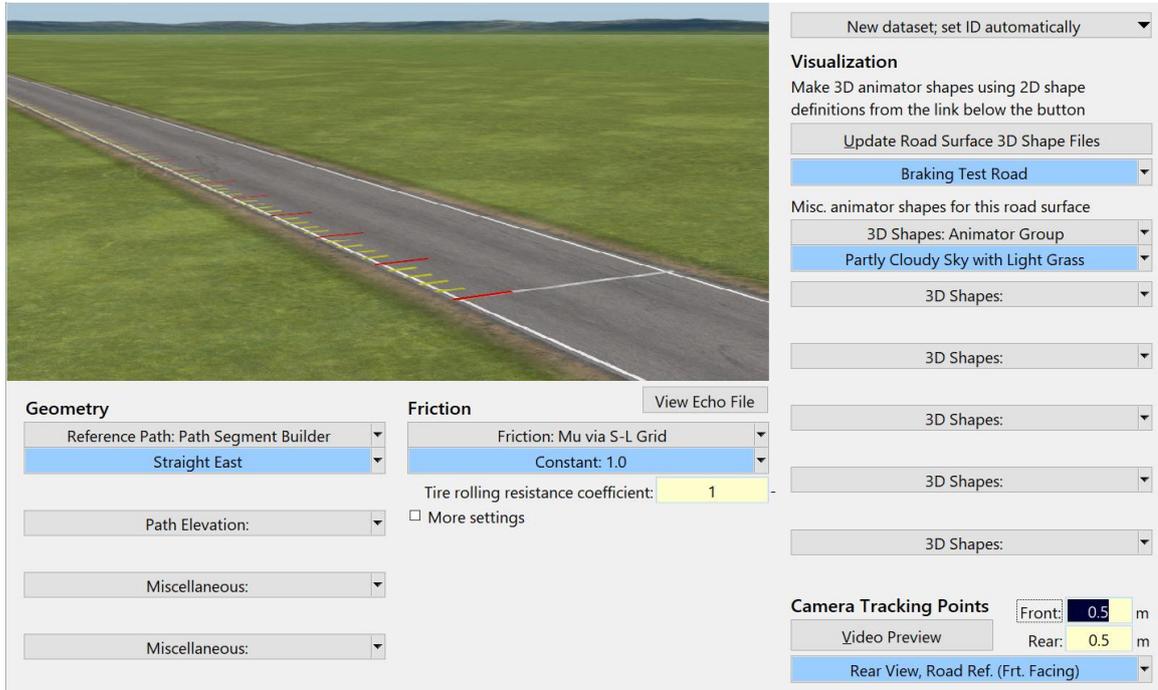


Figura 3-6 Características de la carretera y su entorno físico

Por poner un ejemplo, dentro del menú de “Condiciones Perfectas” se nos abre la imagen de la Figura 3-6. Como se puede observar en el apartado “Friction: Mu via S-L Grid”, en esta ventana es donde CarSim nos permite variar el coeficiente de rozamiento de la carretera, que como podemos observar en este caso es de 1.

### 3.1.3 Entradas y salidas de CARSIM-MATLAB/SIMULINK

En este apartado, se explicará la capacidad de CarSim para trabajar con softwares distintos al propio. CarSim nos permite seleccionar cuáles son los parámetros que queremos introducir en la simulación, y cuáles son los parámetros que queremos extraer de la simulación, permitiendo que esto se traslade a otro entorno como el de Simulink.

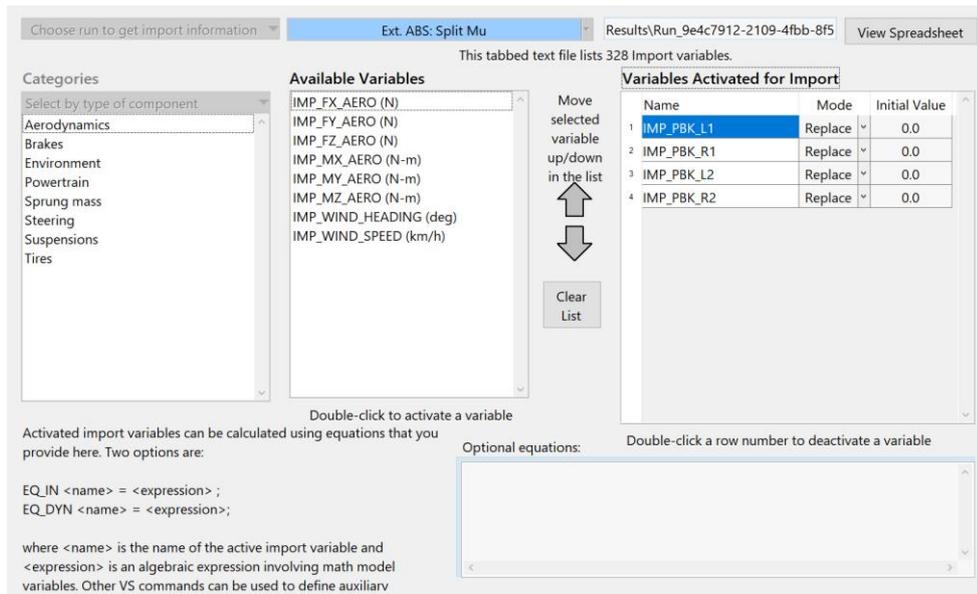


Figura 3-7 Menú de entradas de CarSim

En la Figura 3-7, se puede observar el menú de entradas de CarSim, que se divide en tres apartados. El primero, “Categories” es el que nos ayuda a buscar mejor los parámetros, introduciendo el tipo de unidad que buscamos. Una vez seleccionado el tipo de unidad, en el apartado “Available Variables” se observan todas las variables seleccionables como entrada del sistema, y en el siguiente apartado “Variables Activated for Import”, se pueden ver las variables seleccionadas como entrada en nuestro modelo de CarSim. En este caso, las señales de entrada elegidas son las correspondientes con la presión de los actuadores de los frenos de cada una de las ruedas.

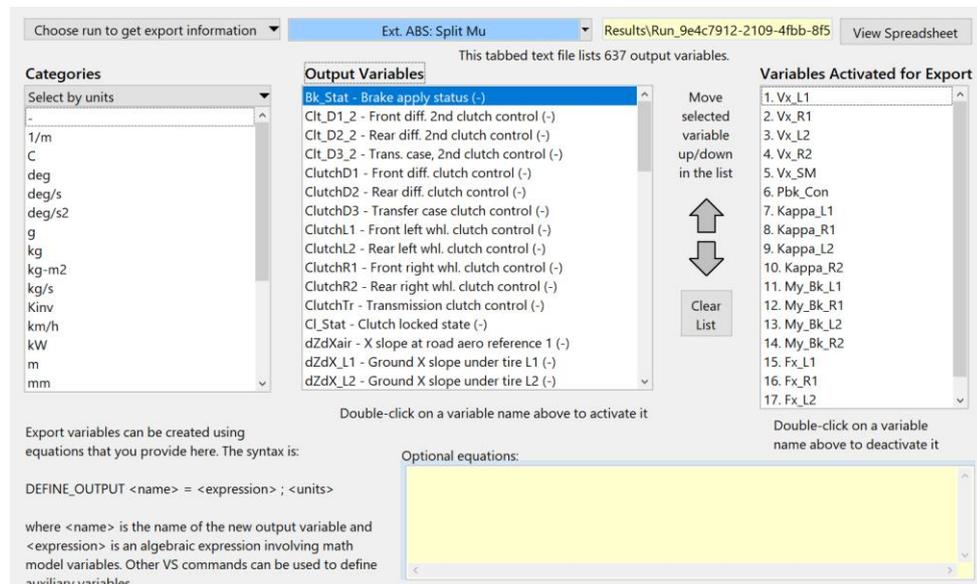


Figura 3-8 Menú de salidas de CarSim

En el caso de la Figura 3-8, observamos las salidas que CarSim nos permite sacar a Simulink. En este caso también observamos tres apartados distintos. El primer apartado, “Categories”, tiene la misma función que en la Figura 3-7. Cuando seleccionamos el tipo de unidad, en el apartado “Output Variables” podemos observar la variedad de parámetros disponibles para extraer de CarSim, ahora ya solo se

tendrían que seleccionar para posteriormente ordenarlos en el siguiente apartado “Variables Activated Export”, el cual es el apartado que nos muestra todas las salidas que se han seleccionado para extraer fuera de CarSim. En este caso se pueden ver 17 de los 18 parámetros seleccionados para ser exportados a Simulink como salidas, denominándose el que falta “Fx\_R2”.

### 3.2 Modelado longitudinal del vehículo

CarSim nos ofrece un entorno en el que se pueden modificar prácticamente todos los parámetros de un vehículo y realizar una simulación sin mayores inconvenientes, esto es, que incorpora un modelo muy detallado del vehículo. Este modelo se puede comunicar con Simulink con el fin de efectuar ensayos en esta plataforma y analizar las salidas que se necesiten de manera más intuitiva.

#### 3.2.1 Modelado del vehículo en Simulink

Uno de los objetivos de este trabajo es el diseño de un modelo sencillo de vehículo que nos pudiera permitir realizar todas las pruebas que necesitamos sin la asistencia de CarSim, sustituyendo el modelo que genera CarSim por este. Para este cometido se pueden utilizar dos tipos de modelo que ya hemos visto en el 2.2.3 de este trabajo, el de medio vehículo y el de un cuarto de vehículo. Para el proyecto se ha decidido utilizar como base el modelo de un cuarto de vehículo que se muestra a continuación, implementando las fórmulas detalladas en el apartado 2.2.3, que llevado a Simulink se muestra como se puede ver en la Figura 3-9.

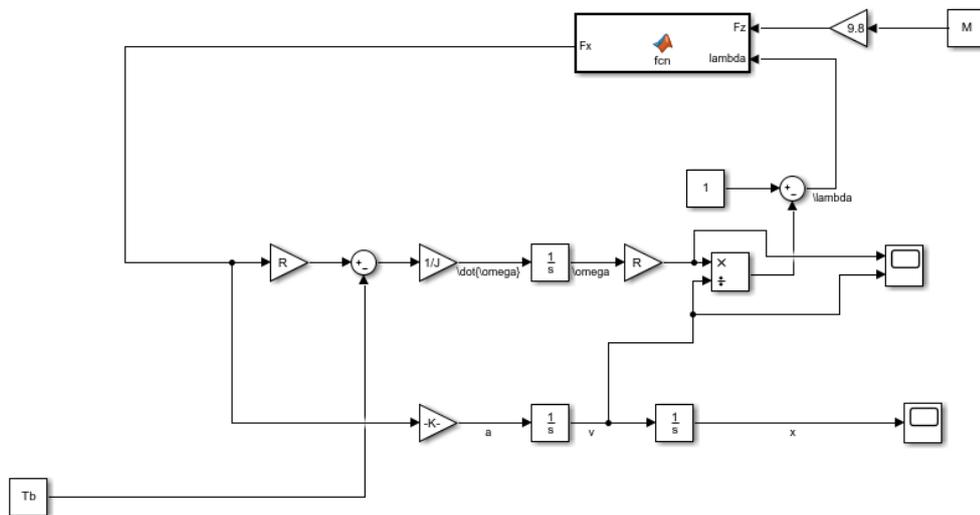


Figura 3-9 modelo de un cuarto de vehículo

Para utilizar en la fase de modelado un control idóneo, se ha decidido optar por un esquema en lazo cerrado de tipo PID como el que vemos en la Figura 3-10. Con este esquema, es necesario añadir una referencia para mantener el valor del slip oscilando sobre ese valor referencia, en este caso ese valor es de 0,1 ya que es el que permite el valor adecuado de agarre al asfalto para la mayoría de las condiciones en que se encuentre la superficie de rodadura.

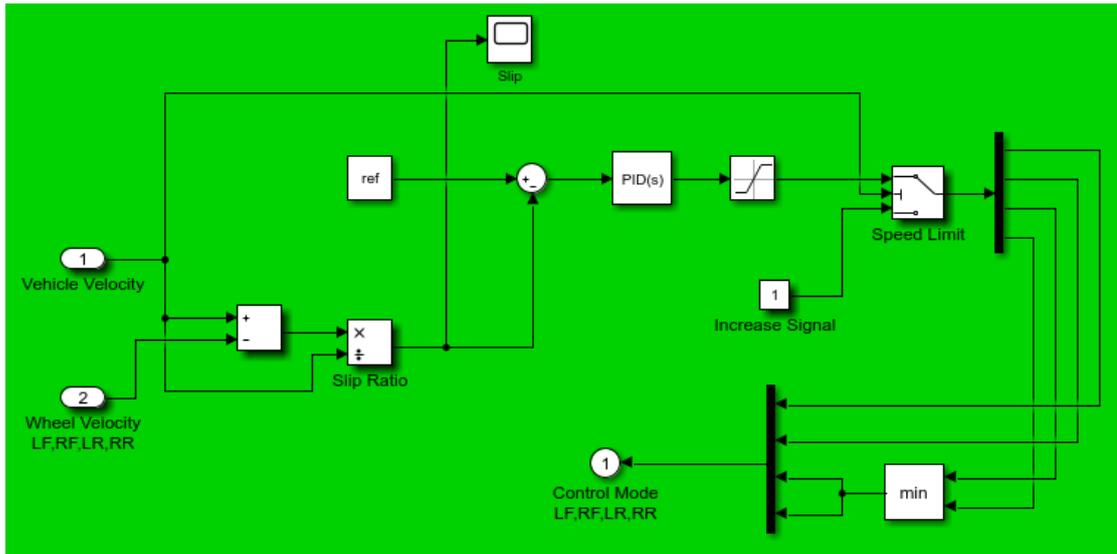


Figura 3-10 Control PID para modelo de CS

En este modelo podemos observar todos los parámetros básicos necesarios para el funcionamiento de un modelo de un cuarto de vehículo. La función *fcn* representa la fórmula de Pacejka cuyas entradas necesarias son el *slip*  $\lambda$  y la fuerza de la masa del vehículo en la dirección del eje Z, la fuerza normal. Como salida obtenemos el valor de  $F_x$  sobre el que posteriormente efectuamos dos operaciones distintas, una para hallar el valor de la velocidad lineal de la rueda en el punto de contacto con el asfalto, y otra para hallar la velocidad del conjunto del vehículo. Estas dos velocidades nos proporcionan el valor del slip que es el que entra finalmente en la fórmula de Pacejka para cerrar el algoritmo.

Al comenzar a diseñar el modelo a partir del modelo de la Figura 3-9, los resultados de los parámetros que se buscaban no eran los deseados ya que no coincidían con los del modelo que ofrecía Simulink. Por este motivo, surgió la necesidad de comparar los resultados del modelo de Simulink con los del modelo de un cuarto y se decidió abrir un espacio en el que las gráficas de ambos modelos se pudieran comparar y de esta manera, poder ajustar el modelo 1/4. Con este fin, el modelo matemático de un cuarto de vehículo debía ser modificado para poder obtener unas salidas con las que comparar la salida de CarSim. Esas salidas son el slip, la velocidad lineal de la rueda en su punto de contacto con la superficie de rodadura, la velocidad del conjunto, la posición, la fuerza de rozamiento y el coeficiente de rozamiento. La mayoría de estos parámetros no es necesario sacarlos con el fin del funcionamiento del sistema, sino que se sacan con el fin de poder realizar la comparación con los parámetros del control ABS predeterminado de CarSim. También necesita unas entradas que son el momento de frenado, la velocidad angular inicial y la velocidad inicial del conjunto. Esto se puede observar en la Figura 3-11, cuando la comparamos con la Figura 3-9.

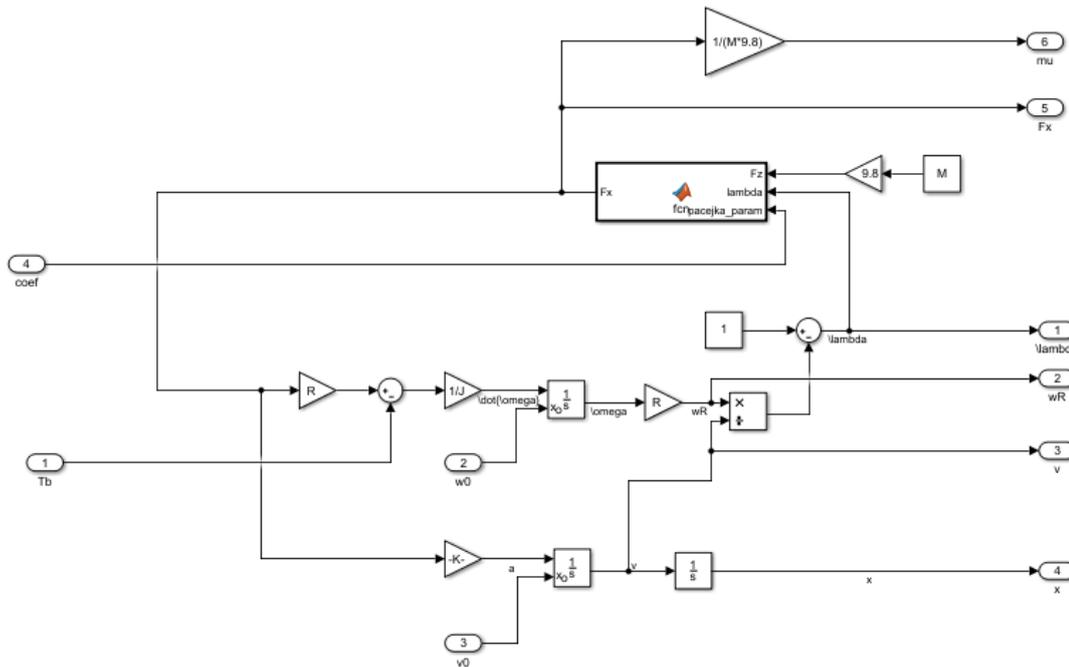


Figura 3-11 Modelo de un cuarto de vehículo modificado

El modelo de la Figura 3-11 lo introducimos dentro de un bloque que permite la entrada y salida de los distintos parámetros mencionados anteriormente. Para completar el modelo matemático del vehículo, es necesario conectar el bloque del modelo al actuador. Como se puede observar en la figura 3-6, estos dos bloques van unidos mediante un factor de conversión de 150 que transforma la salida de presión del actuador hidráulico (MPa) en par de frenado (Nm), es decir, que proporciona 150 Nm de par de frenado por cada MPa de presión del actuador. De esta forma podemos implementar en el modelo del vehículo los actuadores que proporcionan el par de frenado.

Con el fin de poder obtener parámetros parecidos a los del modelo de CarSim, es necesario añadir un controlador, en este caso de tipo PID, teniendo en cuenta que una de las características más importantes a tener en cuenta de este control es que únicamente controla cada rueda individualmente, es decir, para controlar las 4 ruedas tendríamos que aplicar uno de estos controles para cada una, en vez de hacerlo como lo hace el modelo predeterminado ABS de CarSim que tiene en cuenta a la vez las cuatro ruedas en el mismo control.

Una vez hemos conseguido conectar ambos modelos (el de CarSim y el de un cuarto de vehículo) para su correcta comparación, lo único que se debe hacer es modificar o ajustar determinados parámetros para que las gráficas del modelo de un cuarto de vehículo se asemejen lo máximo posible a las gráficas del modelo de CarSim. Ambos modelos están conectados de la forma que se muestra en la Figura 3-12:

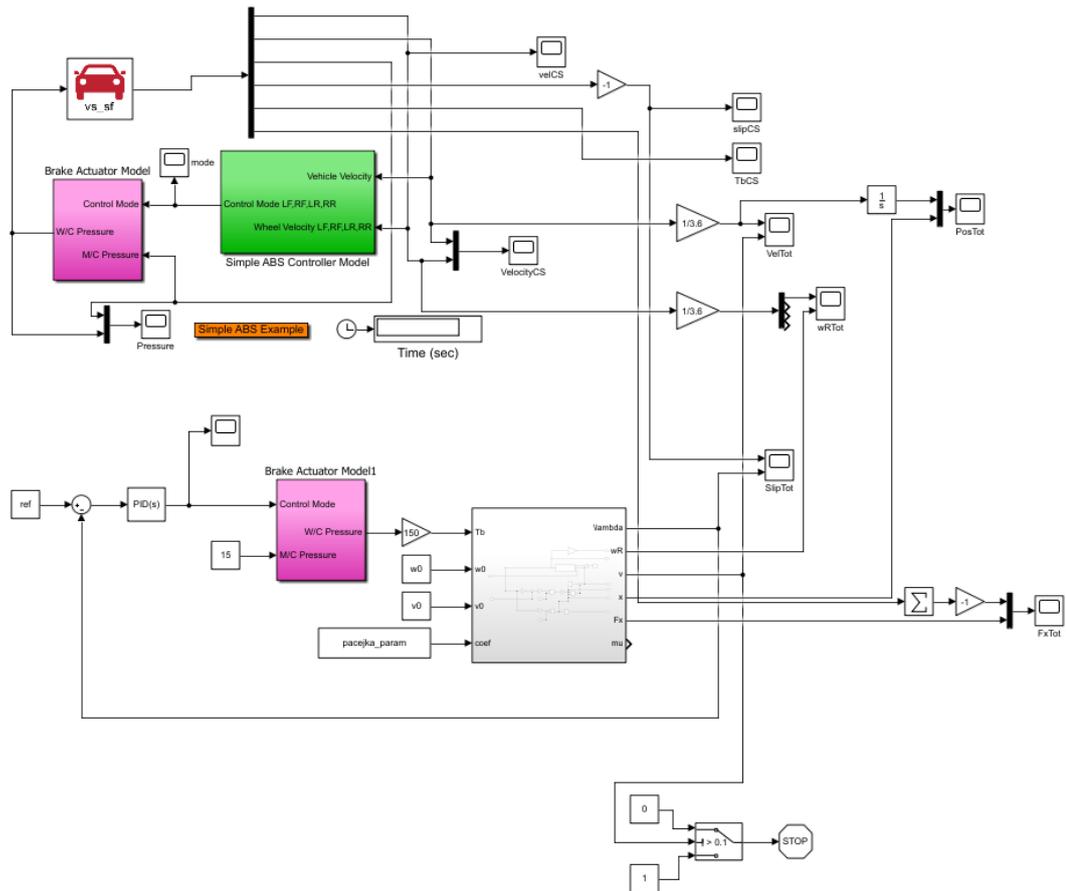
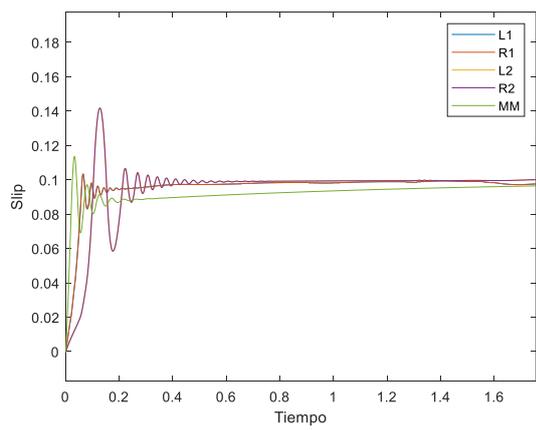
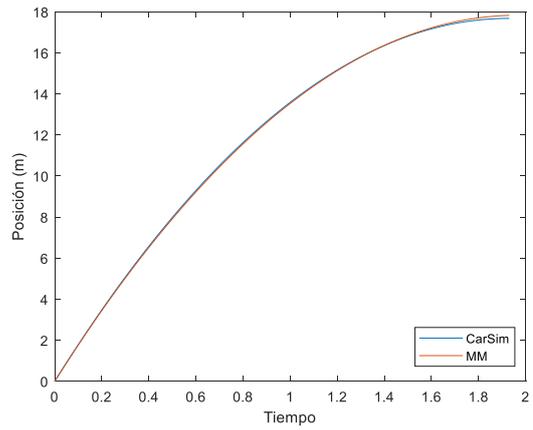


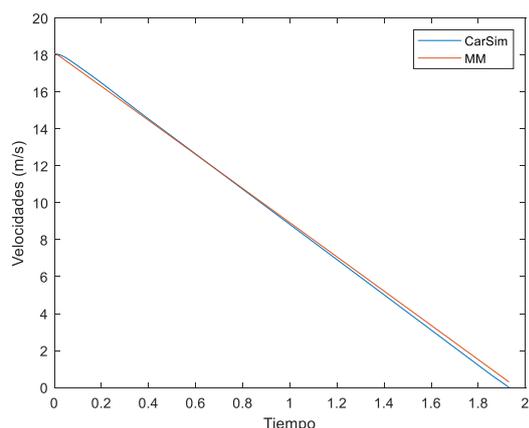
Figura 3-12 Modelos 1/4 y CS conectados



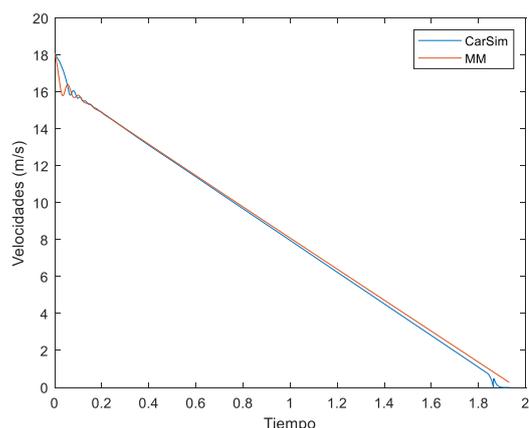
Slip



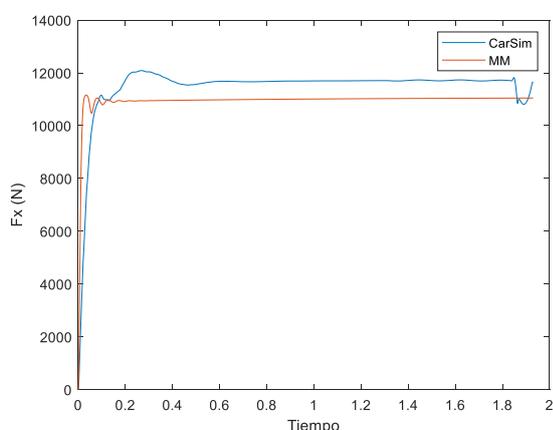
Posición



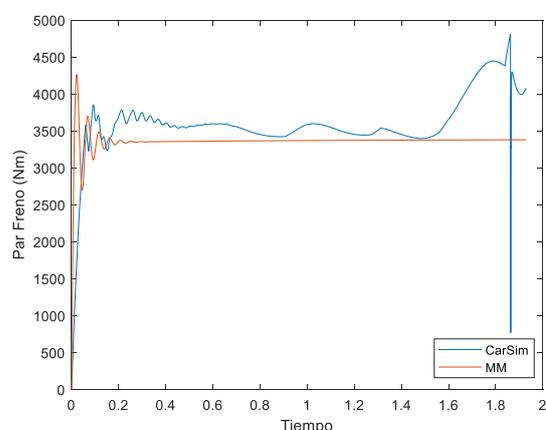
Velocidad del vehículo



Velocidad de rueda



Fuerza de fricción



Par de frenado

**Tabla 3-2 Gráficas comparativas del modelo de CarSim y el modelo matemático de Simulink**

Como se puede observar en las gráficas, el modelo matemático emula aceptablemente bien las gráficas del modelo que proporciona CarSim, por lo tanto, el modelo se considera válido para su uso en el proceso de diseño de esquemas de control para frenos ABS. El modelo matemático quedaría de la forma que podemos observar en la Figura 3-13 y con los parámetros que observamos en la:

M (masa suspendida)	1110 kg
Wheel_mass (masa rueda)	20 kg
R (radio medio de rueda)	0.297 m
J (momento de inercia todas las ruedas)	3.52 kg/m <sup>2</sup>
Ref (referencia de slip)	0.1

**Tabla 3-3 Parámetros seleccionados para el modelo matemático**

Parámetro A	0.96
Parámetro B	13
Parámetro C	1.9
Parámetro D	0.96
Parámetro E	0.1

Tabla 3-4 Parámetros de la fórmula de Pacejka

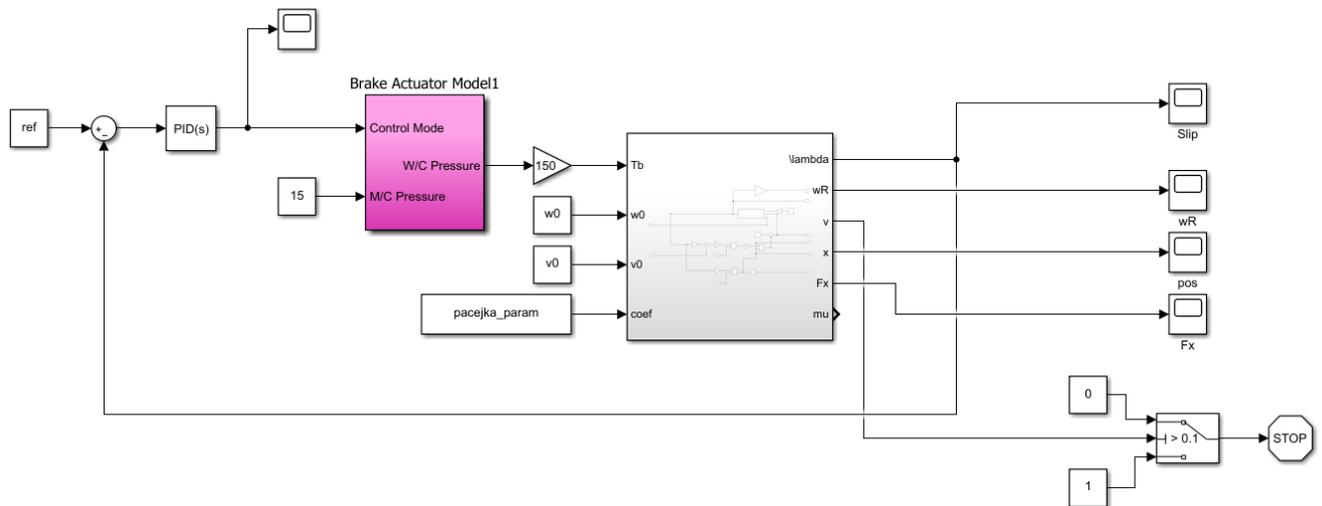


Figura 3-13 Modelo matemático del vehículo con control PID

### 3.3 Diseño del control del vehículo

Una vez realizado el modelo del vehículo y del sistema de frenado se puede diseñar un controlador válido para el conjunto. Para realizar se pueden hacer ciertas simplificaciones para obtener un modelo lineal, que nos permita evaluar distintos tipos de control. Los controladores que se van a diseñar son un control Nudo-Nada (muy común en este tipo de sistemas), y un control clásico basado en PIDs.

#### 3.3.1 Control Todo-Nada

Cuando seleccionamos en CarSim un test que nos permite comprobar la eficiencia de un ABS, el control predeterminado que nos aparece en el programa al abrirlo en Simulink es el siguiente:

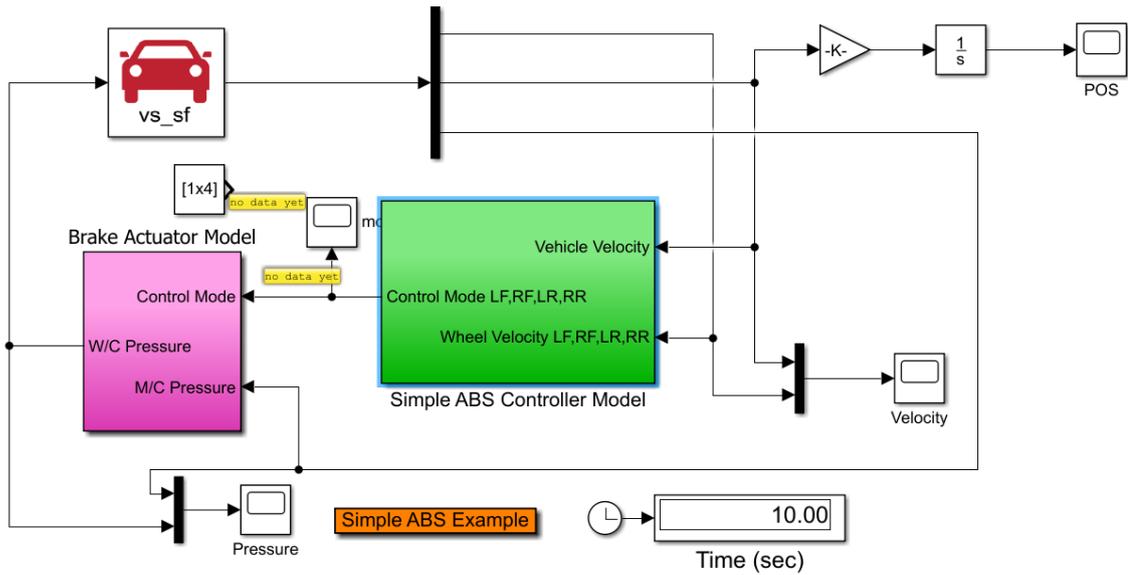


Figura 3-14 Modelo ABS predeterminado de CarSim

Como podemos ver en la Figura 3-14 que ha sido extraída de Simulink, se puede observar que el modelo de control del ABS se encuentra en el bloque Verde, controlando cada una de las ruedas individualmente. Si se observa en detalle el bloque de control llamado *Simple ABS Controller Model*, este está compuesto por los elementos mostrados en la Figura 3-15:

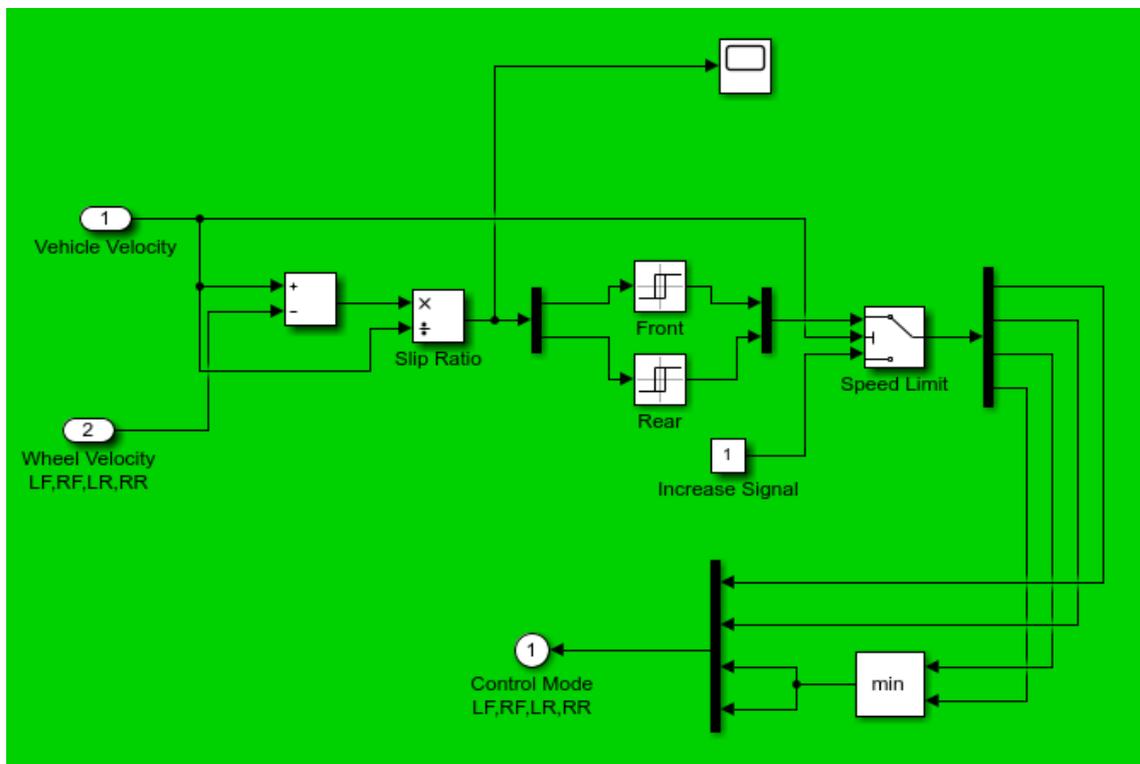


Figura 3-15 control ABS de CarSim

Se tienen dos entradas que podemos observar a la izquierda de la figura, la velocidad del vehículo y la velocidad lineal de las ruedas en su punto de contacto con la superficie de rodadura. Ambas

velocidades se restan, y esta diferencia se divide entre la velocidad del vehículo, como se puede observar en la ecuación (1.1), de ahí sacaremos el valor del slip o deslizamiento. Posteriormente dividimos este deslizamiento entre las dos ruedas traseras y las dos delanteras y se establecen unos valores límite superior e inferior entre los cuales se permite que oscile el deslizamiento, que son  $\lambda_{sup} = 0.1$  y  $\lambda_{inf} = 0.05$ , en lo que se denomina un bloque relé. Una vez establecidos los límites, se introduce un “switch” que hace que en el momento que exista un determinado slip, se active el control y por lo tanto el ABS, hasta que se alcanza una velocidad muy pequeña, haciendo que el sistema active el freno por completo (esta velocidad es una velocidad en la cual la diferencia entre bloquear o no bloquear la rueda es insignificante). Este algoritmo de control se divide posteriormente entre cada rueda para que exista un control específico de cada una de ellas.

### 3.3.2 Controlador PID

El esquema de control PID que se utiliza para los experimentos de este trabajo lo podemos observar en la Figura 3-10, explicándose en el apartado 3.2.1 su funcionamiento.

#### 3.3.2.1 Sintonización

Una de las fases más importantes en el diseño de todos los esquemas de control PID es la determinación de los parámetros necesarios para el buen funcionamiento del control, o denominado de otra manera, la sintonización. El objetivo principal de la sintonización es el de determinar los parámetros del controlador que cumpla con las especificaciones del transitorio y del estado estacionario del sistema en lazo cerrado. El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador [9]. Para llevar a cabo dicha sintonización hay dos maneras principales:

- **Métodos de Ziegler-Nichols:** Propusieron unas normas para determinar los valores de las constantes de proporcionalidad, integración y derivación  $K_p$ ,  $T_i$ , y  $T_d$  respectivamente, en base a las características de la respuesta transitoria de una planta determinada. Esta determinación la llevarían a cabo los ingenieros mediante experimentos sobre dicha planta. Existen dos métodos principales para la sintonización de una planta por el método de Ziegler-Nichols:
  - **Primer método:** la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, tal como se muestra en la Figura 3-16 Respuesta a un escalón unitario de una planta. Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de S. Tales curvas de respuesta escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta. La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo  $L$  y la constante de tiempo  $T$ . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea  $c(t) = K$  tal como se muestra en la Figura 3-17 [9].

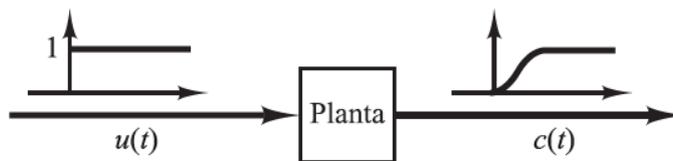


Figura 3-16 Respuesta a un escalón unitario de una planta

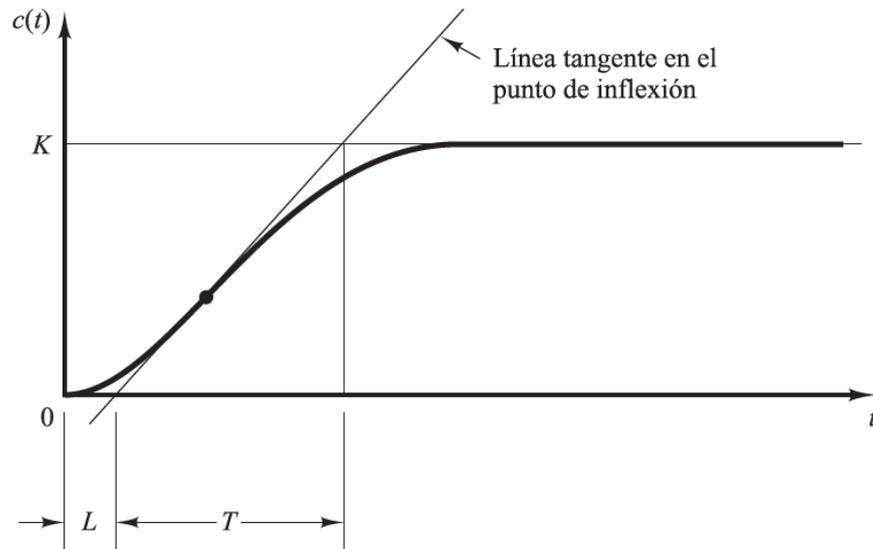


Figura 3-17 Curva de respuesta en forma de S

- **Segundo método:** En el segundo método, primero se fija  $T_i = \infty$  y  $T_d = 0$ . Usando sólo la acción de control proporcional (véase la Figura 3-18), se incrementa  $K_p$  desde 0 hasta un valor crítico  $K_{cr}$ , en donde la salida presente oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar  $K_p$ , entonces este método no se puede aplicar.) Así, la ganancia crítica  $K_{cr}$  y el periodo  $P_{cr}$  correspondiente se determinan experimentalmente (véase la Figura 3-19) [9].

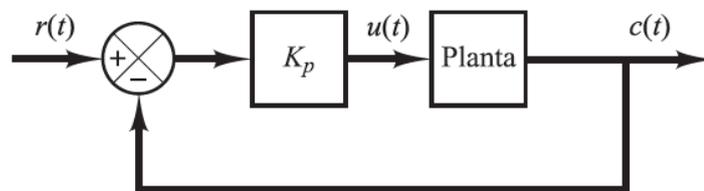


Figura 3-18 Sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional

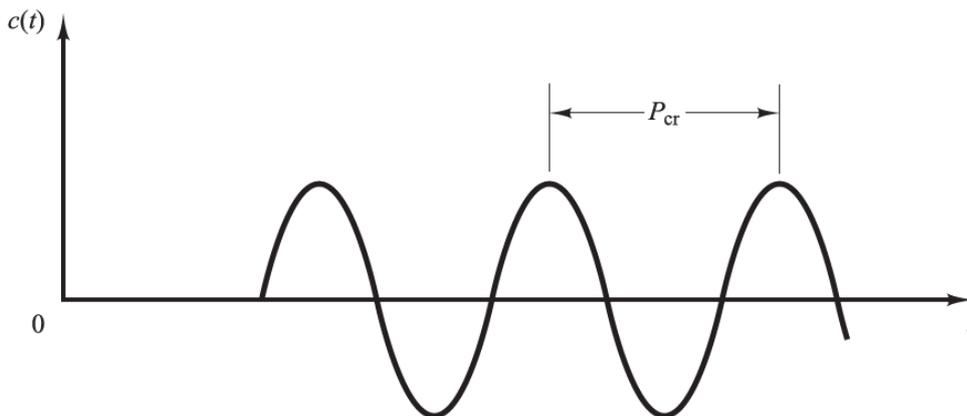


Figura 3-19 Oscilación sostenida con periodo  $P_{cr}$  ( $P_{cr}$  se mide en segundos)

- **Heurístico:** Según la RAE, “en algunas ciencias es la manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos como por tanteo, reglas empíricas, etc.”. En este caso se trataría de modificar los parámetros  $K_p$ ,  $T_i$ , y  $T_d$  mediante un método de prueba y error hasta acercarnos lo máximo posible a los resultados buscados. En este trabajo, se utiliza el método heurístico para hallar los parámetros del PID del modelo matemático de Simulink.

Para seleccionar los parámetros que figuran en la Tabla 3-3 se ha tratado de utilizar el primer método de Ziegler-Nichols pero al ser una respuesta tan rápida, el error en la toma de medidas hace que los parámetros varíen notablemente y la respuesta que se consigue no es la deseada, por lo tanto, se ha decidido utilizar el método heurístico con la ayuda del modelo matemático en Simulink. Los parámetros seleccionados finalmente son  $K_p = 100$ ,  $K_i = 80$  y  $K_d = 0$ .

## 4 RESULTADOS

En este apartado veremos los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con CarSim. Los resultados de las pruebas varían según las condiciones del entorno, las diferentes velocidades iniciales y el tipo de esquema de control, de tal manera que se puedan observar con facilidad las diferencias entre las configuraciones distintas de cada uno de estos tres parámetros. El esquema de Simulink utilizado para las pruebas es el que se puede observar en la Figura 4-1. Es de relevante importancia que los resultados de las pruebas se dividan de una forma ordenada, para su posterior análisis, el cuál llevaremos a cabo también en parte, en este punto.

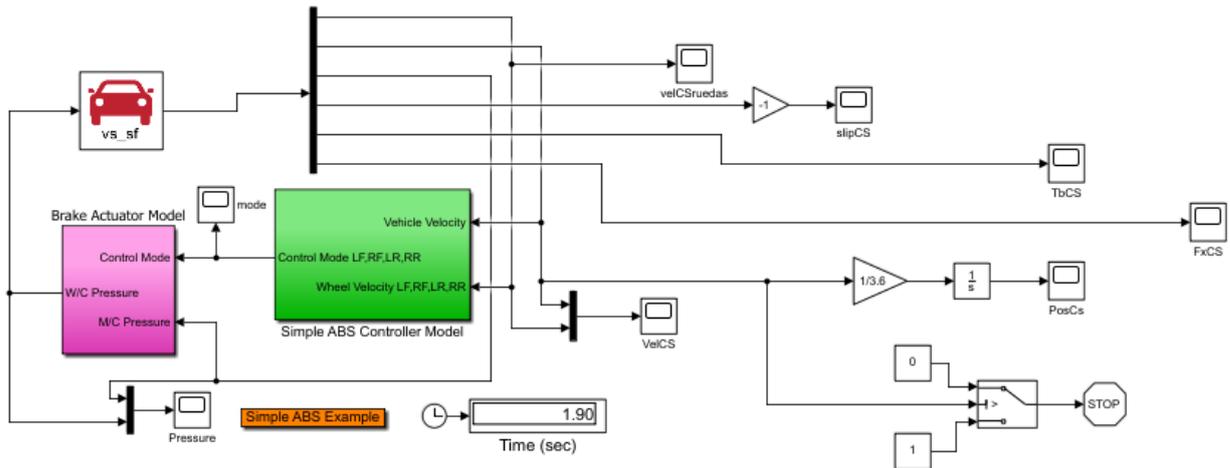


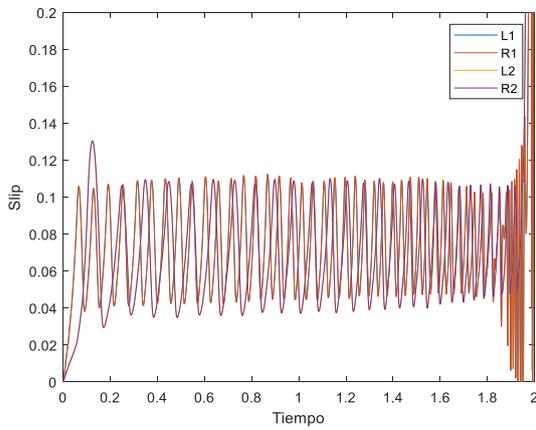
Figura 4-1 Esquema de Simulink utilizado para los ensayos

### 4.1 Experimentos por tipo de condiciones y por tipo de control con velocidad fija

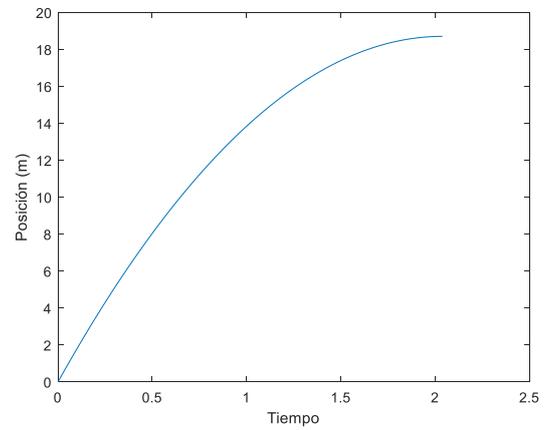
En este apartado variaremos las condiciones del entorno entre las cuatro condiciones mencionadas en el apartado 3.1 de este trabajo, y en cada una de estas condiciones se probarán los 2 controladores ABS tipo Todo-Nada y PID respectivamente, junto con una prueba más en la que se podrán observar los resultados en el caso de que no existiera ningún tipo de controlador ABS en el vehículo.

### 4.1.1 Condiciones perfectas

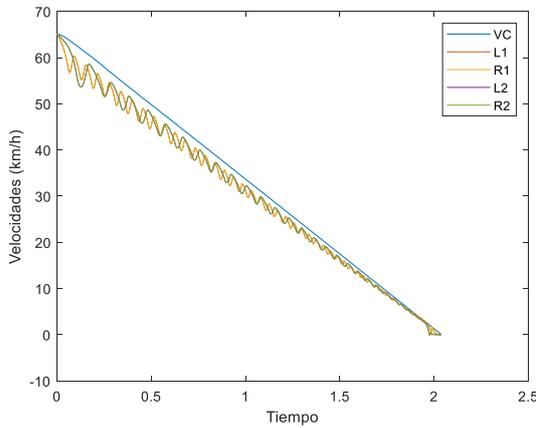
#### 4.1.1.1 Control Todo-Nada a 65km/h



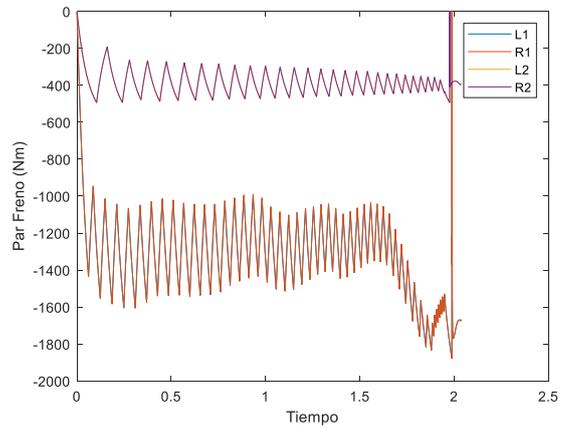
**Slip (slipCS)**



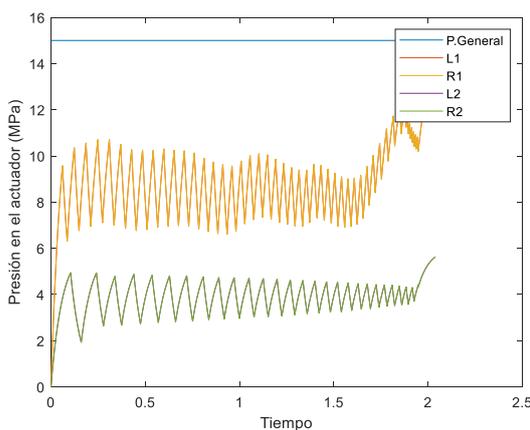
**Posición (PosCS)**



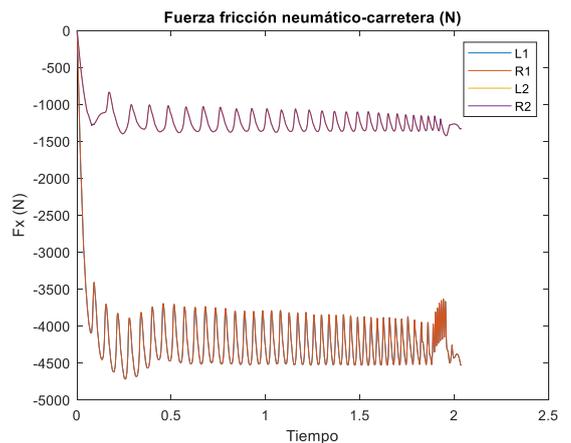
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



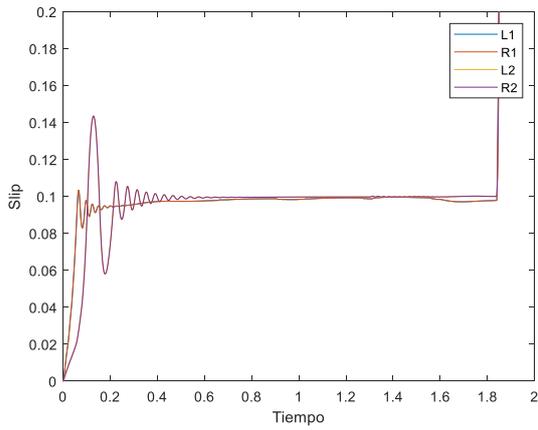
**Presión del actuador (PresCS)**



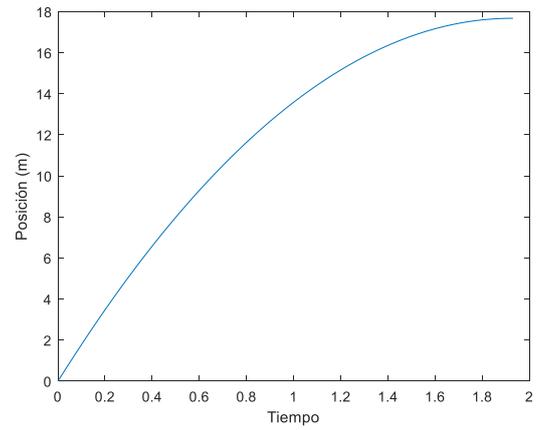
**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-1 Control Todo-Nada en condiciones perfectas a 65 km/h**

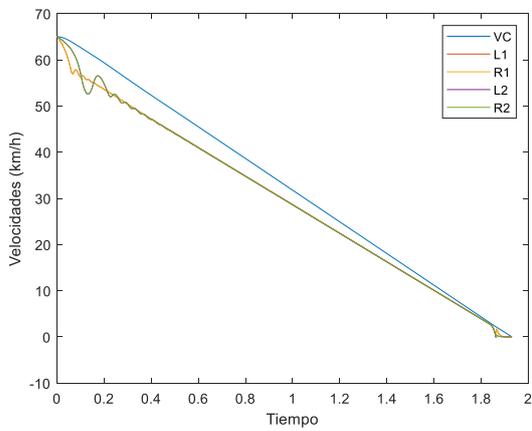
4.1.1.2 Control PID a 65km/h



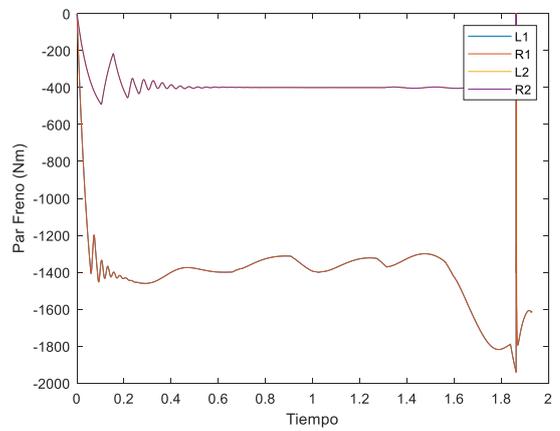
Slip (slipCS)



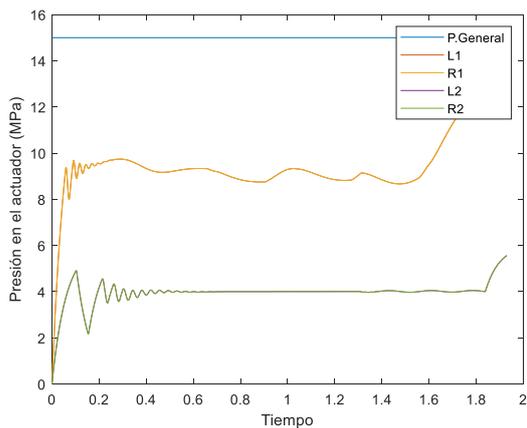
Posición (PosCS)



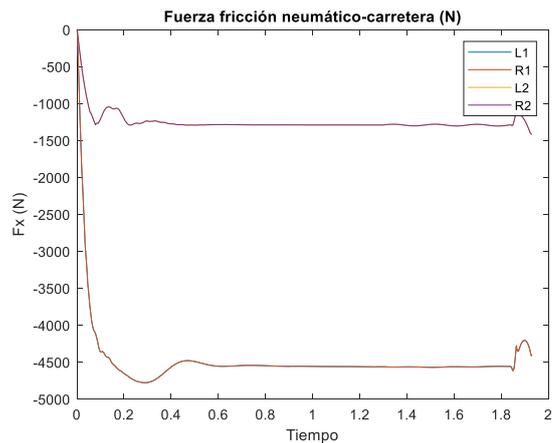
Velocidades de coche y ruedas (velCS)



Par de frenado (TbCS)



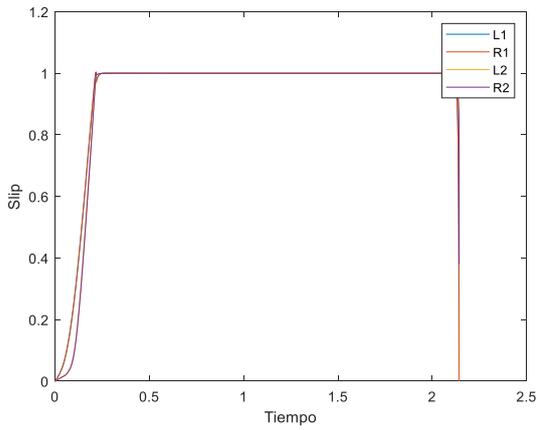
Presión del actuador (PresCS)



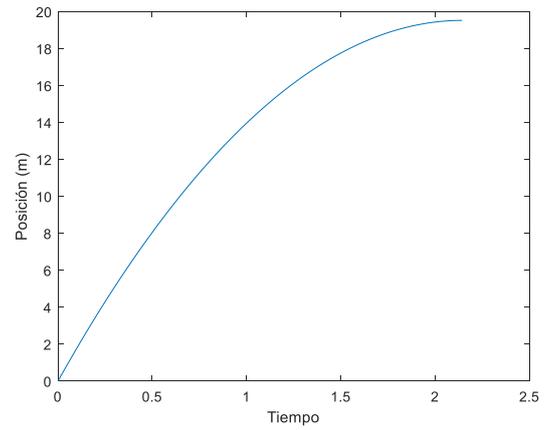
Fuerza de rozamiento (FxCS)

Tabla 4-2 Control PID en condiciones perfectas a 65 km/h

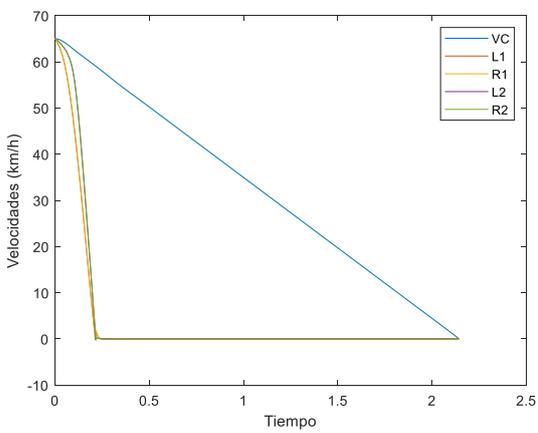
### 4.1.1.3 Sin control ABS a 65km/h



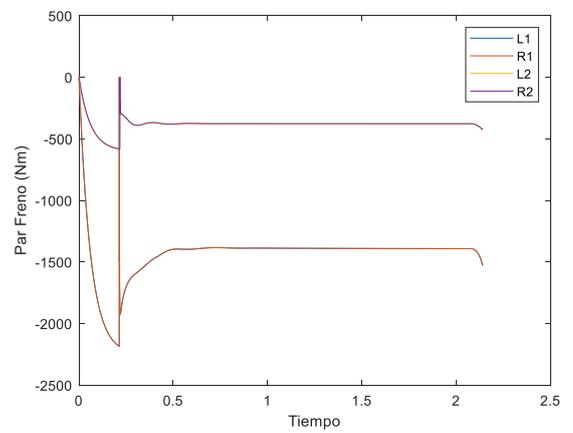
**Slip (slipCS)**



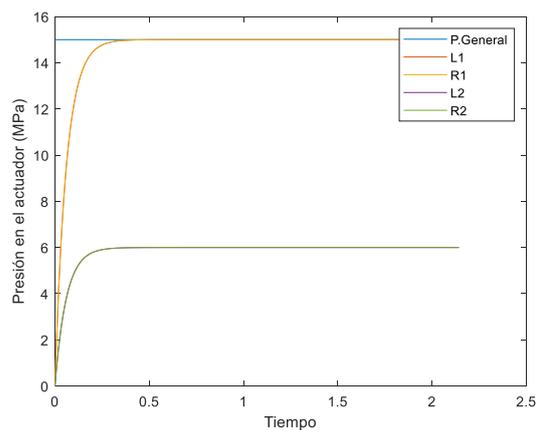
**Posición (PosCS)**



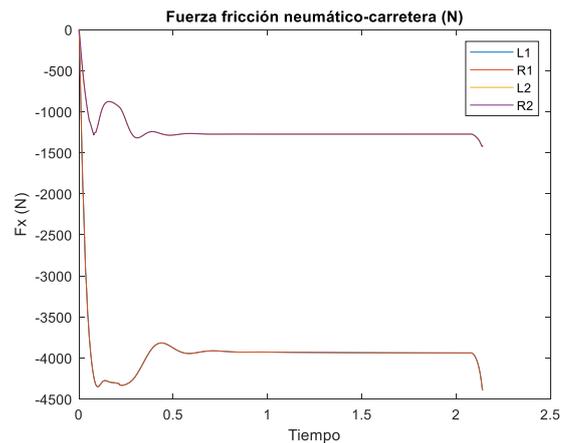
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



**Presión del actuador (PresCS)**

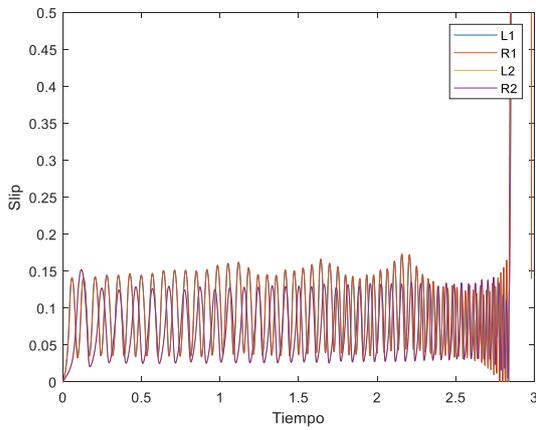


**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

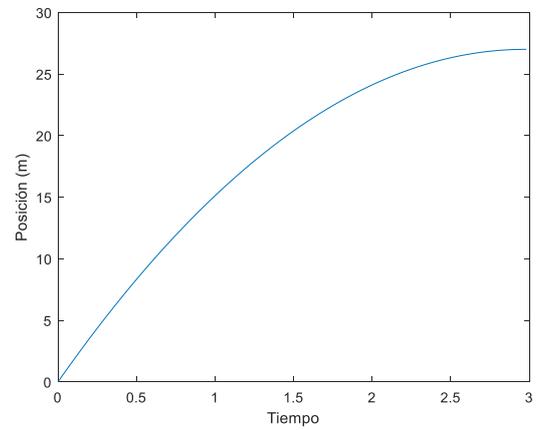
**Tabla 4-3 Modelo sin control ABS en condiciones perfectas a 65 km/h**

### 4.1.2 Superficie mojada

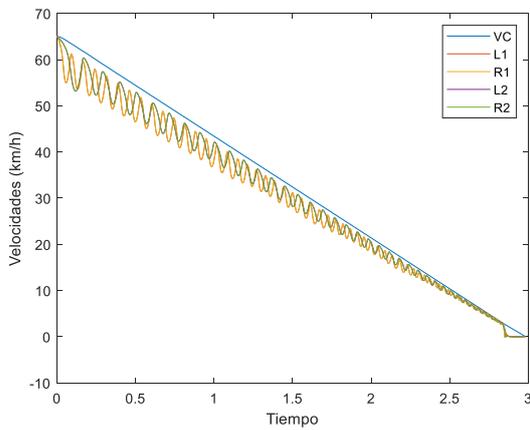
#### 4.1.2.1 Control Todo-Nada a 65km/h



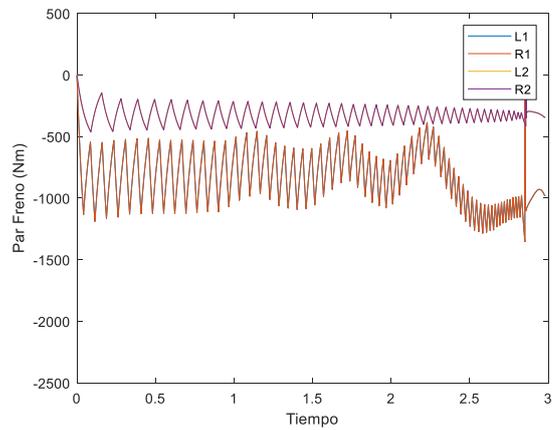
**Slip (slipCS)**



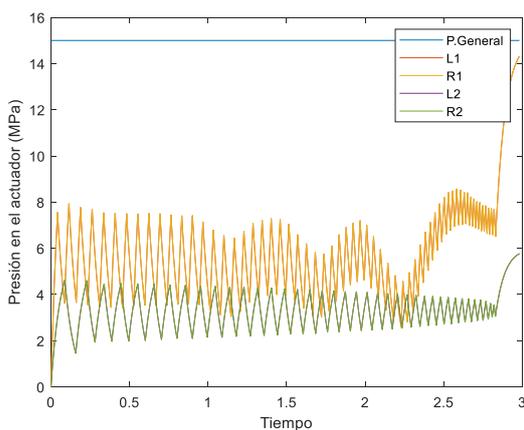
**Posición (PosCS)**



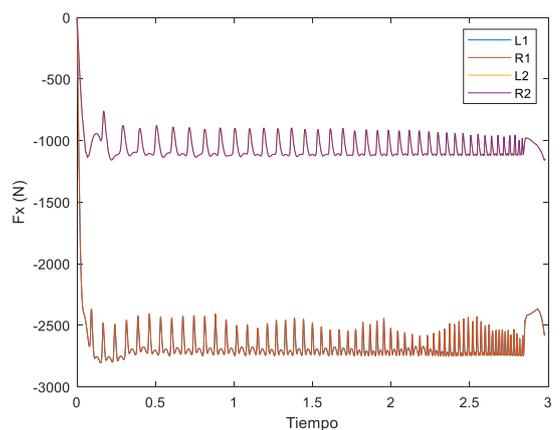
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de freno (TbCS)**



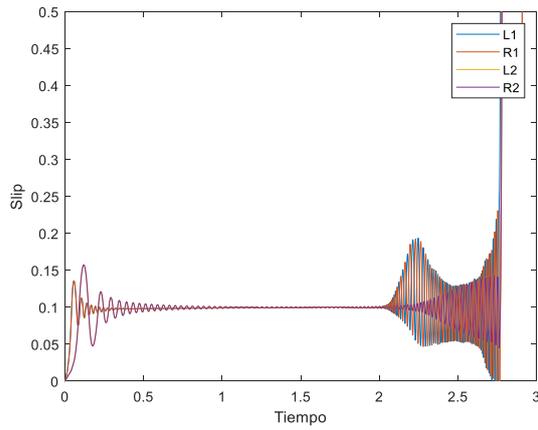
**Presión del actuador (PresCS)**



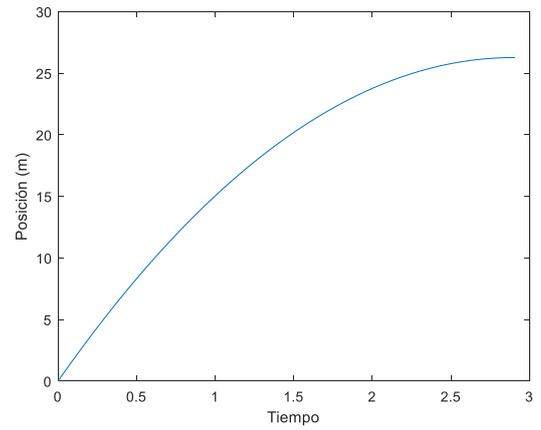
**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-4 Control Todo-Nada en condiciones de superficie mojada a 65 km/h**

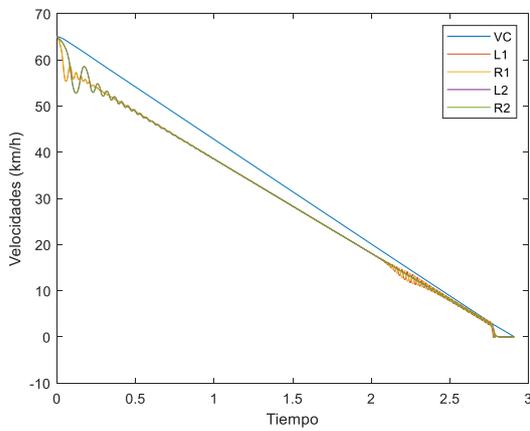
### 4.1.2.2 Control PID a 65km/h



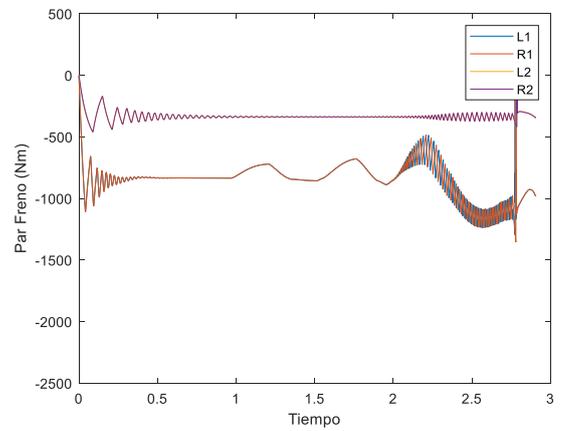
**Slip (slipCS)**



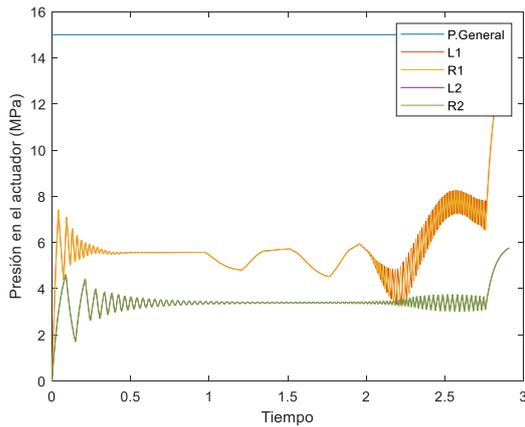
**Posición (PosCS)**



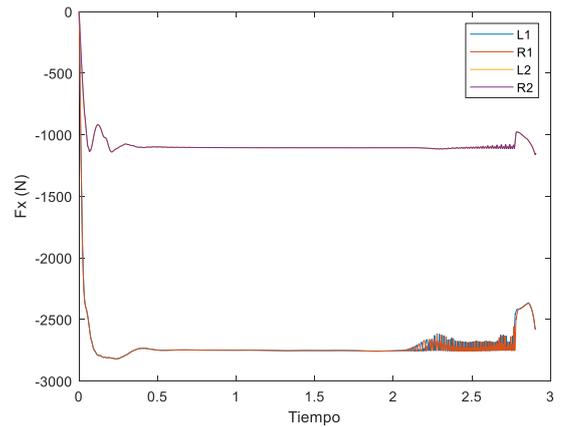
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



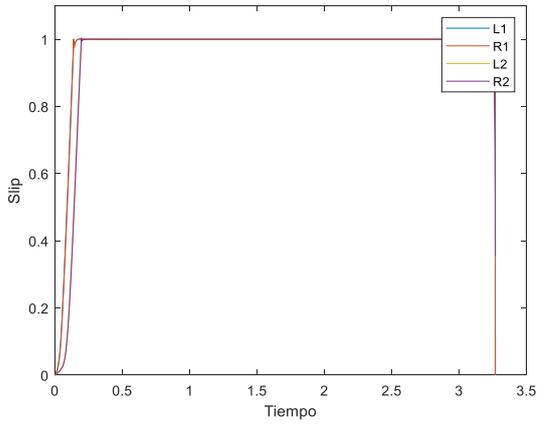
**Presión del actuador (PresCS)**



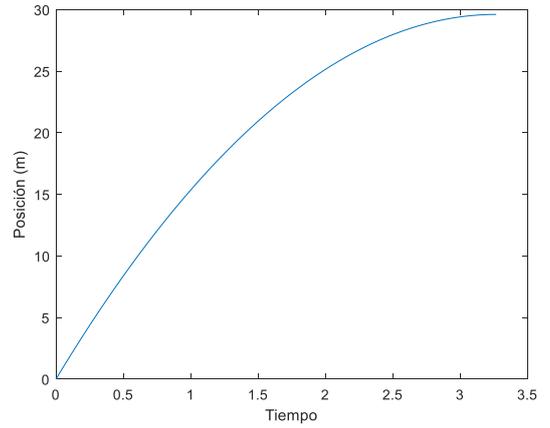
**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-5 Control PID en condiciones de superficie mojada a 65 km/h**

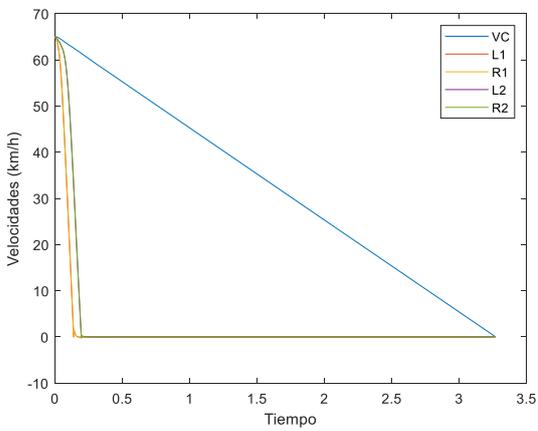
4.1.2.3 Sin control ABS a 65km/h



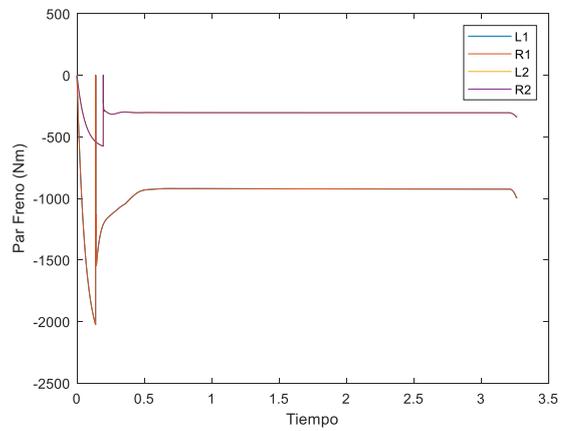
Slip (slipCS)



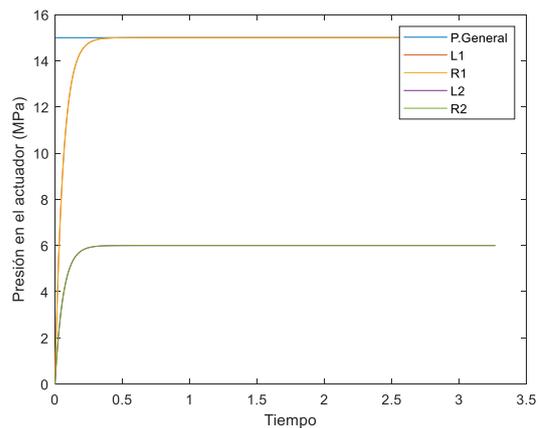
Posición (PosCS)



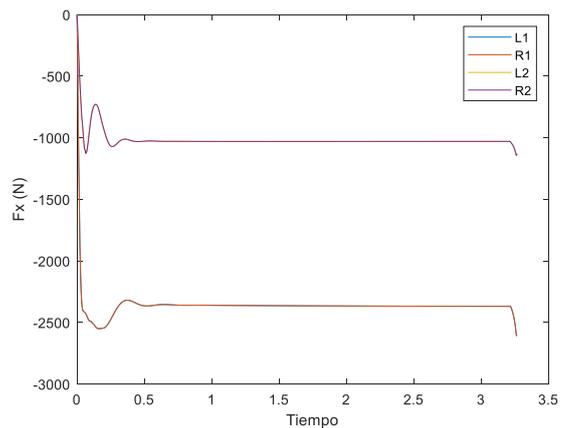
Velocidades de coche y ruedas (velCS)



Par de frenado (TbCS)



Presión del actuador (PresCS)

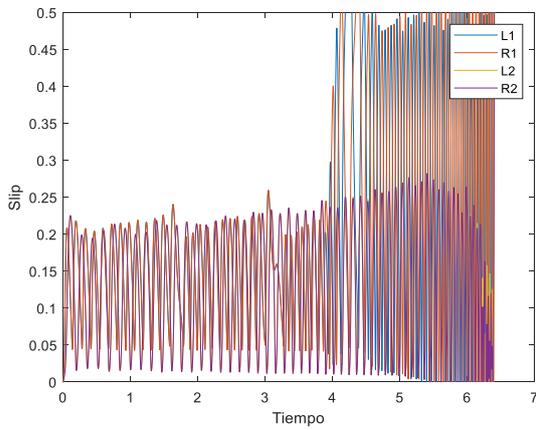


Fuerza de rozamiento (FxCS)

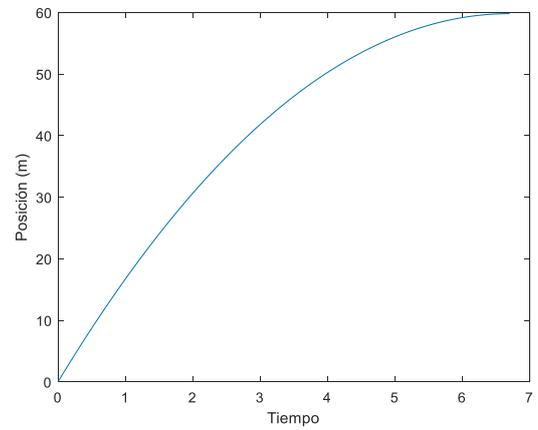
Tabla 4-6 Modelo sin control ABS en condiciones de superficie mojada a 65 km/h

### 4.1.3 Superficie con hielo/nieve

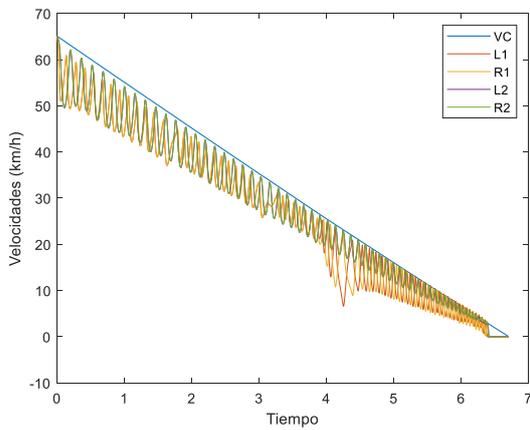
#### 4.1.3.1 Control Todo-Nada a 65km/h



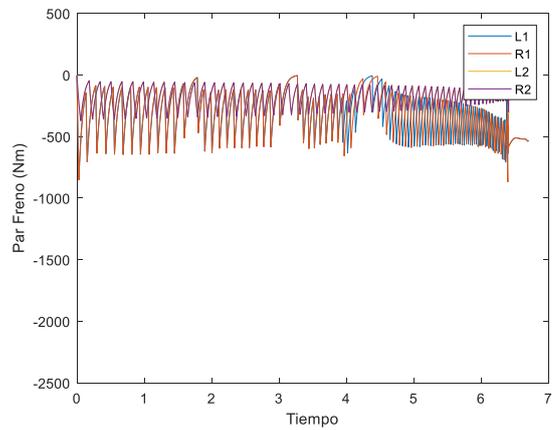
**Slip (slipCS)**



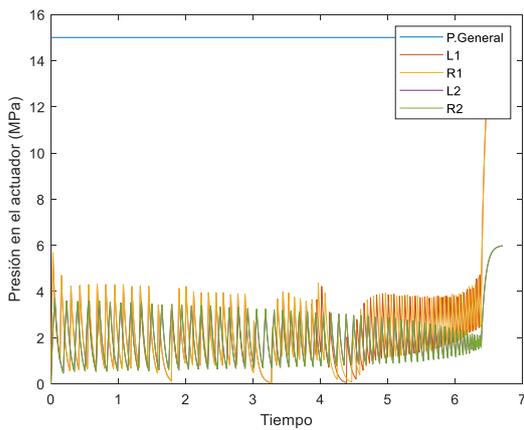
**Posición (PosCS)**



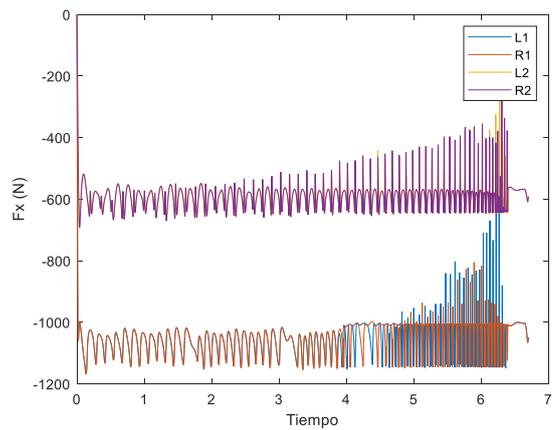
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



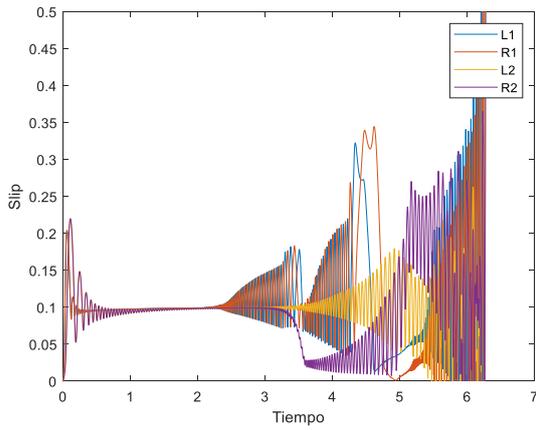
**Presión del actuador (PresCS)**



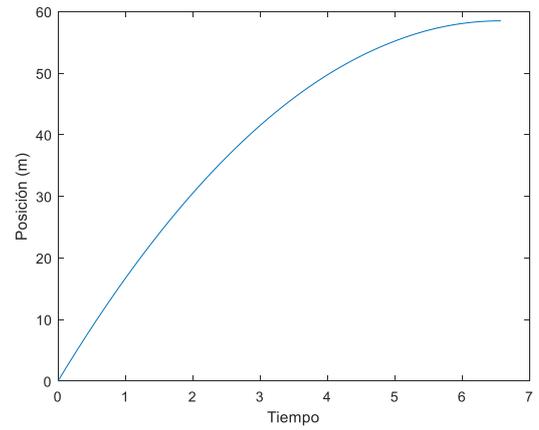
**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-7 Control Todo-Nada en condiciones de superficie con hielo/nieve a 65 km/h**

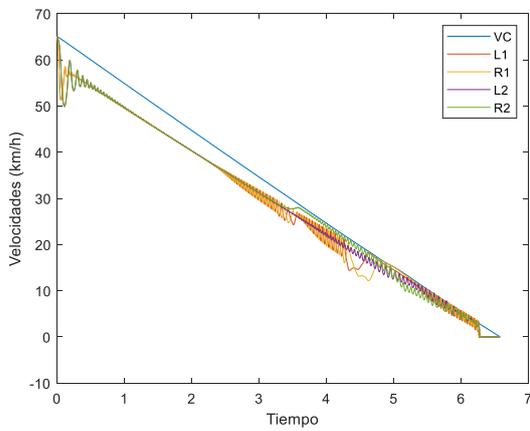
### 4.1.3.2 Control PID a 65km/h



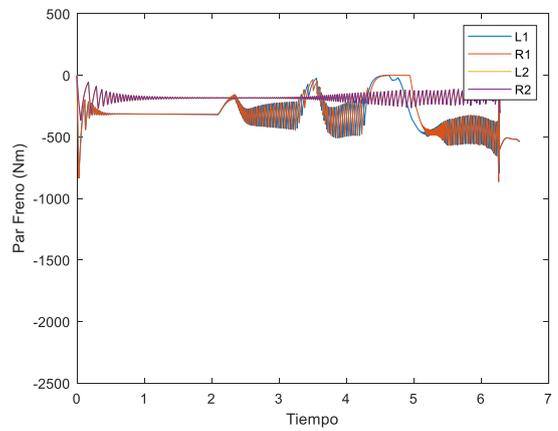
**Slip (slipCS)**



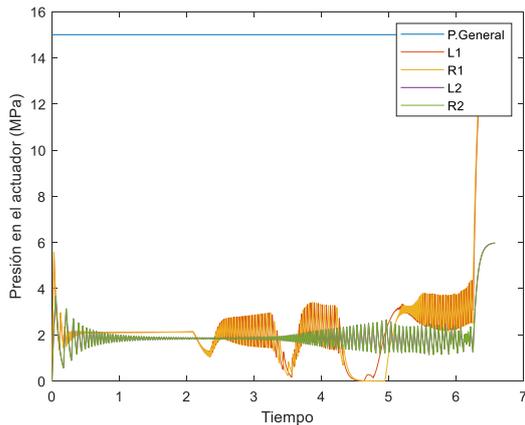
**Posición (PosCS)**



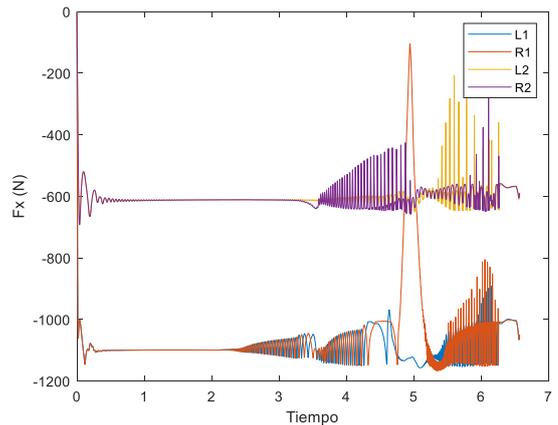
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



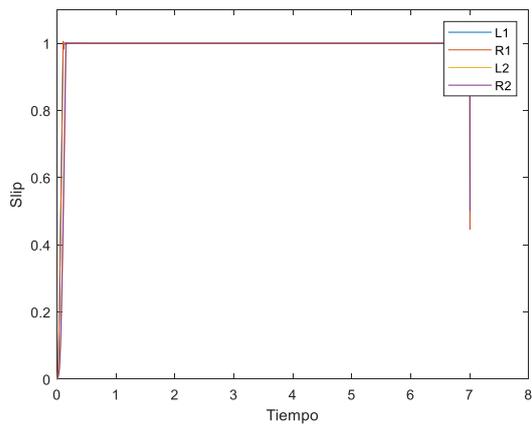
**Presión del actuador (PresCS)**



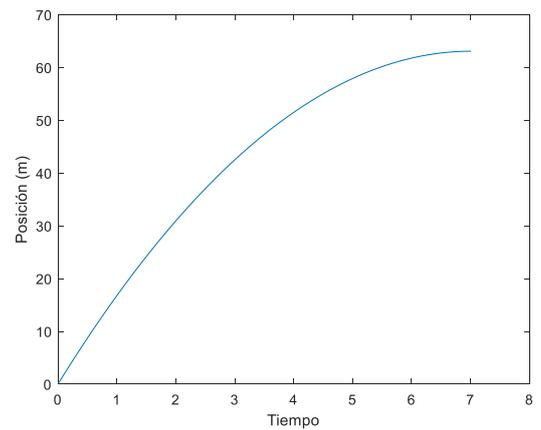
**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-8 Control PID en condiciones de superficie con hielo/nieve a 65 km/h**

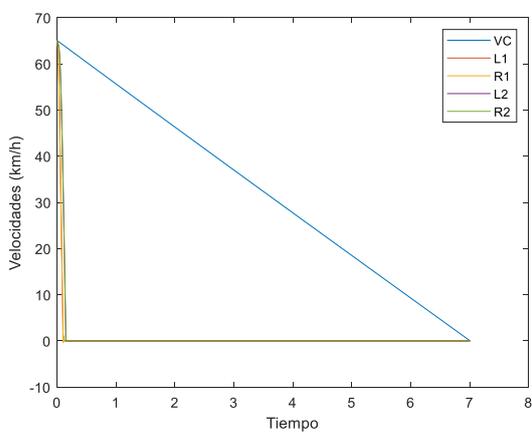
### 4.1.3.3 Sin control ABS a 65km/h



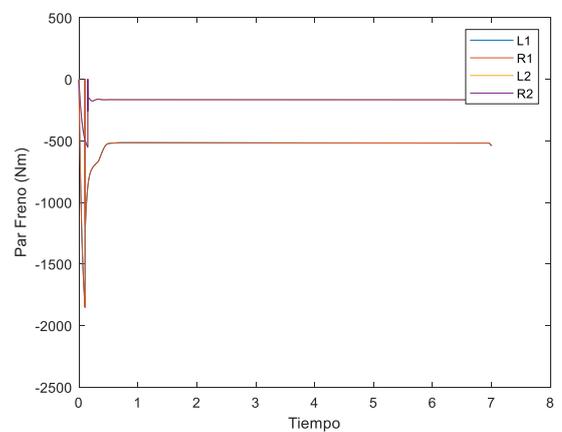
**Slip (slipCS)**



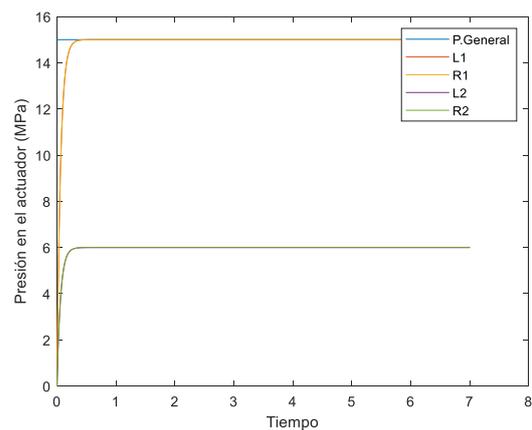
**Posición (PosCS)**



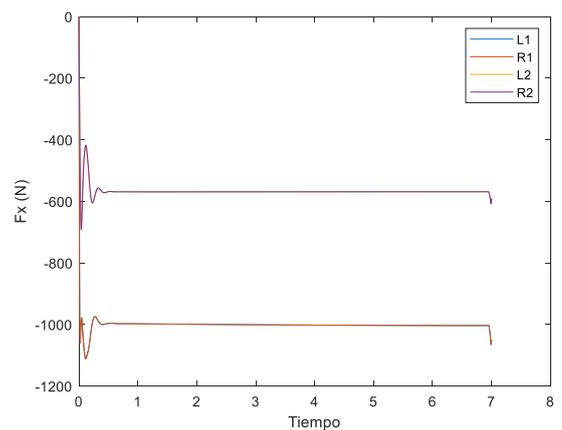
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



**Presión del actuador (PresCS)**

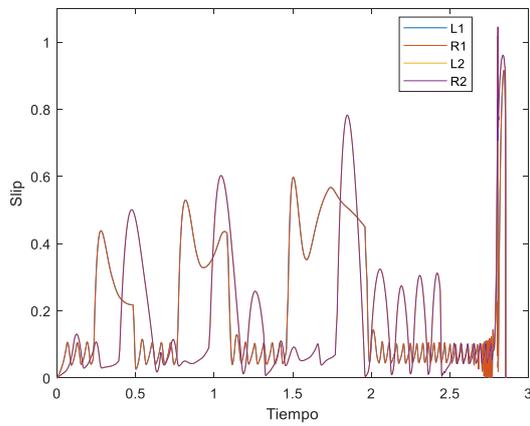


**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

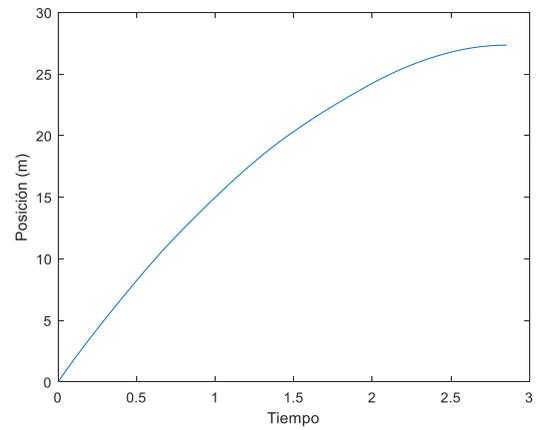
**Tabla 4-9 Modelo sin control ABS en condiciones de superficie con hielo /nieve a 65 km/h**

### 4.1.4 Superficie cambiante a tramos

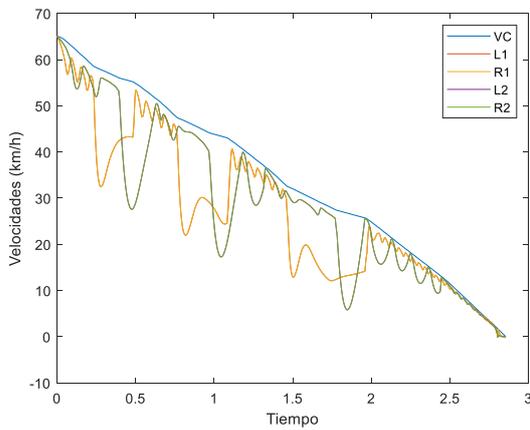
#### 4.1.4.1 Control Todo-Nada a 65km/h



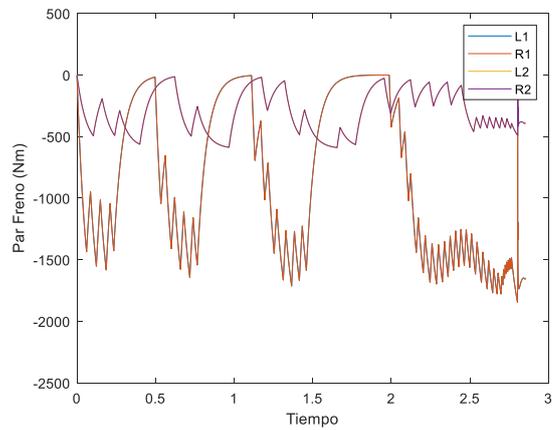
**Slip (slipCS)**



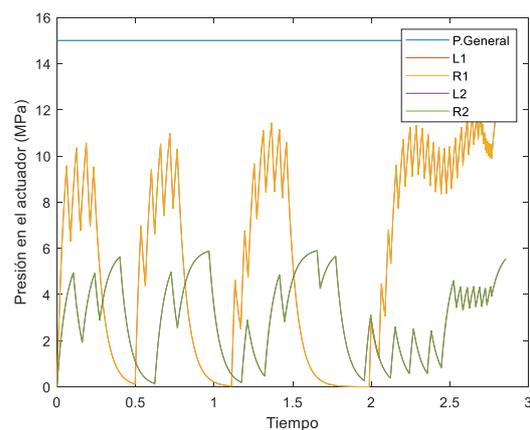
**Posición (PosCS)**



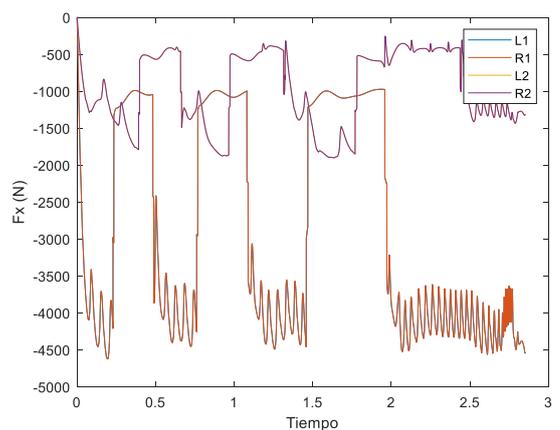
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



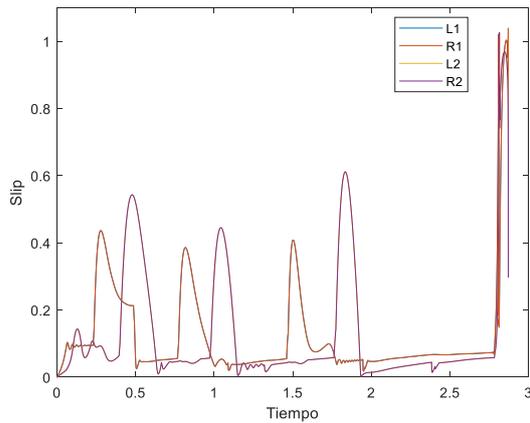
**Presión del actuador (PresCS)**



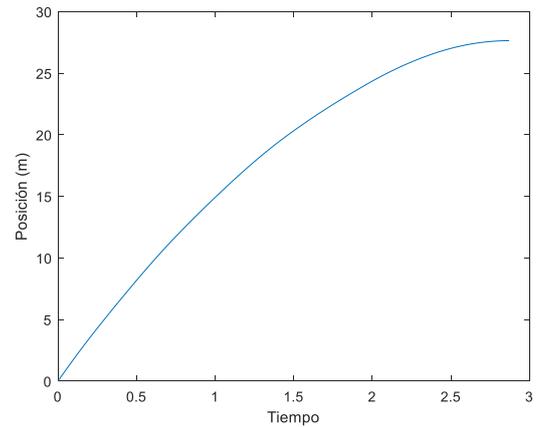
**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-10 Control Todo-Nada en condiciones de superficie interválica a 65 km/h**

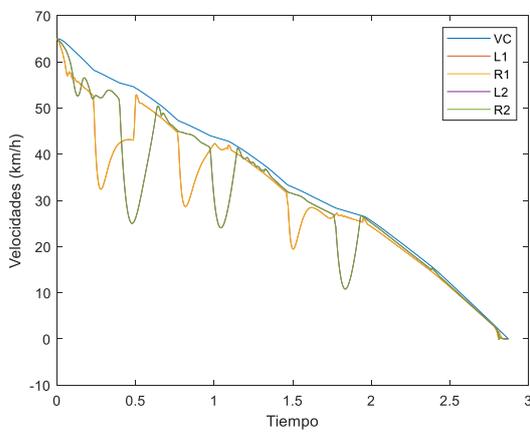
### 4.1.4.2 Control PID a 65km/h



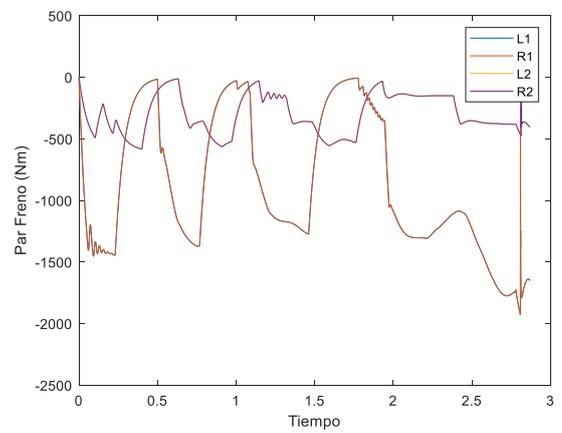
**Slip (slipCS)**



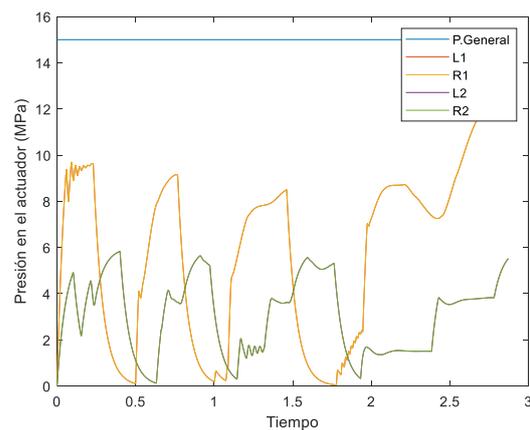
**Posición (PosCS)**



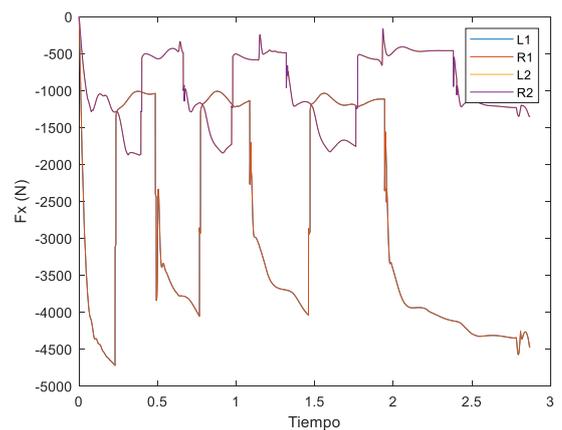
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



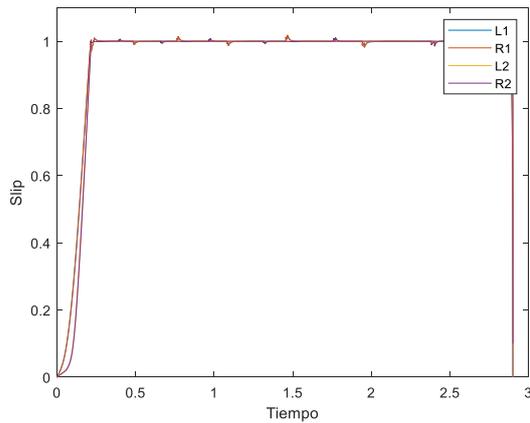
**Presión del actuador (PresCS)**



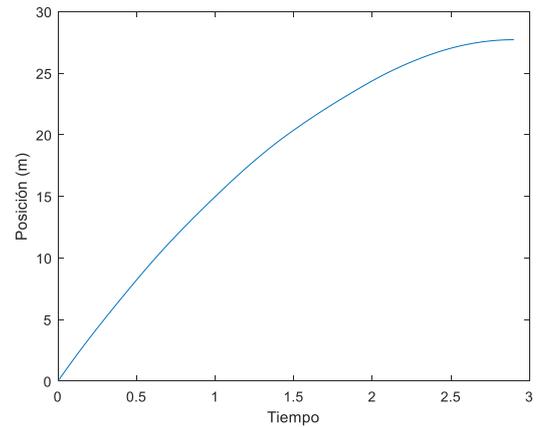
**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-11 Control PID en condiciones de superficie interválica a 65 km/h**

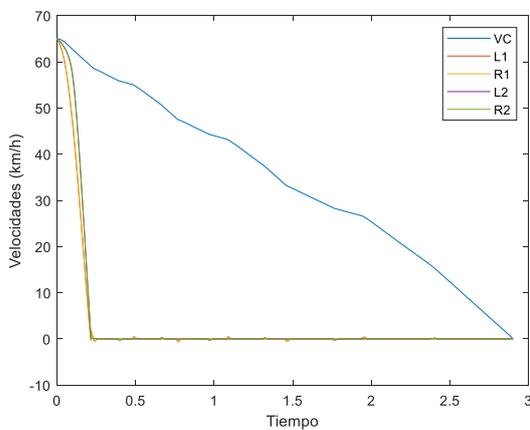
### 4.1.4.3 Sin control ABS a 65km/h



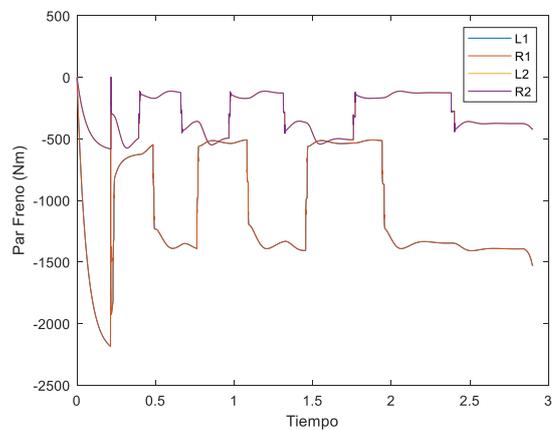
**Slip (slipCS)**



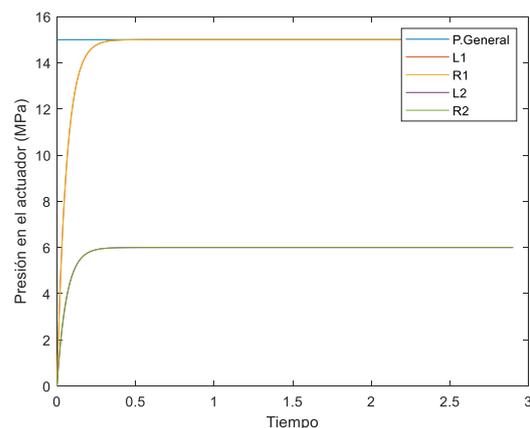
**Posición (PosCS)**



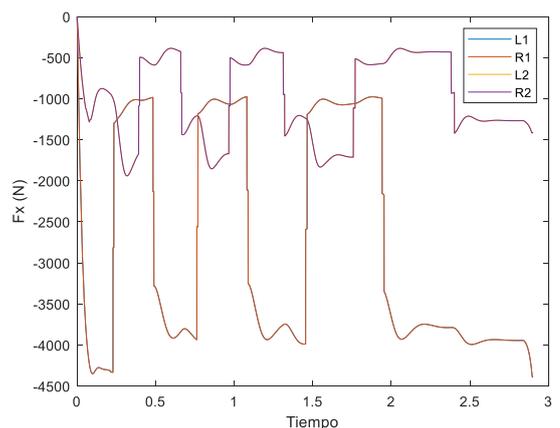
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de freno (TbCS)**



**Presión del actuador (PresCS)**



**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-12 Modelo sin control ABS en condiciones de superficie interválica a 65 km/h**

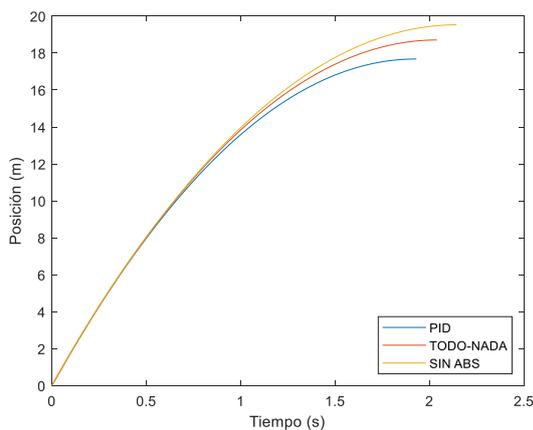
### 4.1.5 Comentario

Una buena “vara de medir” para analizar los resultados de estas pruebas es fijarse en la posición final del vehículo, es decir, la longitud de frenado y el tiempo de frenado, ya que estos datos son los que se pretende reducir con los diferentes sistemas de frenado del vehículo. En este caso observamos que,

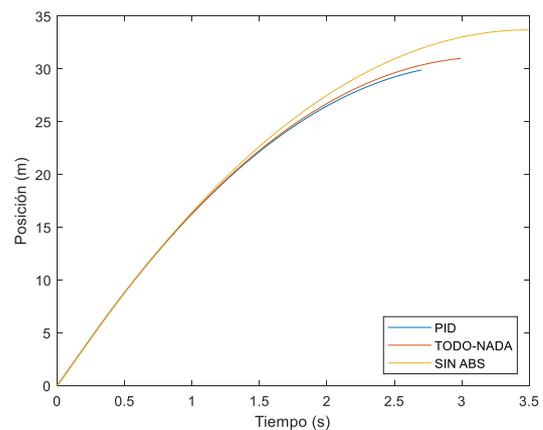
en general, la longitud de frenado es mayor en la configuración sin ABS, posteriormente se reduce también cuando le añadimos el controlador Todo-Nada, y finalmente se vuelve a reducir cuando le ponemos el controlador PID. Pasa lo mismo con el tiempo de frenado, se va reduciendo empezando por el vehículo sin ABS, posteriormente por el esquema de control Todo-Nada y por último por el esquema de control PID. También se puede observar como varía esta longitud en función de las condiciones del entorno, siendo más larga aquella en la que el coeficiente de rozamiento es menor, en este caso la nieve ( $\mu = 0,3$ ), y la más corta aquella en la que el coeficiente de rozamiento es mayor, en este caso, las condiciones del entorno denominado de “condiciones perfectas” ( $\mu = 1$ ).

En términos de longitud y superficie de frenado, se puede observar que los resultados son muy parecidos en aquellas pruebas en las que las condiciones del entorno son alternativas entre coeficientes de rozamiento ( $\mu_1 = 1 ; \mu_2 = 0,3$ ) y aquellas en las que las condiciones del entorno simulan una superficie de rodadura con lluvia, con un coeficiente de rozamiento constante ( $\mu = 0,65$ ). Es por ello que se hace necesario analizar el resto de gráficas en estos escenarios, ya que nos posibilitan la observación de los cambios en el coeficiente de rozamiento de la superficie. En este caso, se puede observar una clara diferencia en las gráficas de las velocidades, ya que en las condiciones del entorno alternativas se aprecia una leve ondulación en la caída de la velocidad, mientras que en las condiciones de lluvia, la pendiente negativa es constante y sin ondulaciones. En añadidura, se puede observar en la Figura 4-2 cómo para este tipo de condiciones, el controlador tipo Todo-Nada tiene ligeramente menor tiempo de frenado y distancia de frenado, y por lo tanto se podría considerar mejor para este tipo de superficies cambiantes.

Otro de los resultados que más llama la atención es el slip en los diferentes tipos de control, independientemente de las condiciones del entorno. Como se puede observar, en los esquemas de control tipo Todo-Nada el slip es muy fluctuante, mientras que en los tipos PID esto no es así. El tiempo de asentamiento se reduce considerablemente en los esquemas PID, y esto es debido a que únicamente se tiene una variable de referencia en lugar de dos, por lo que los controladores tipo Todo-Nada realmente no tienen asentamiento alguno. A pesar de ello, cuando se pretende forzar el fallo en las condiciones del entorno alternativas, a ambos esquemas de control les cuesta asentarse y adquirir el valor del slip óptimo. De esta forma se puede observar gráficamente el momento en el que el vehículo pasa por un tipo de superficie de rodadura o por otro.



Condiciones ideales



Lluvia

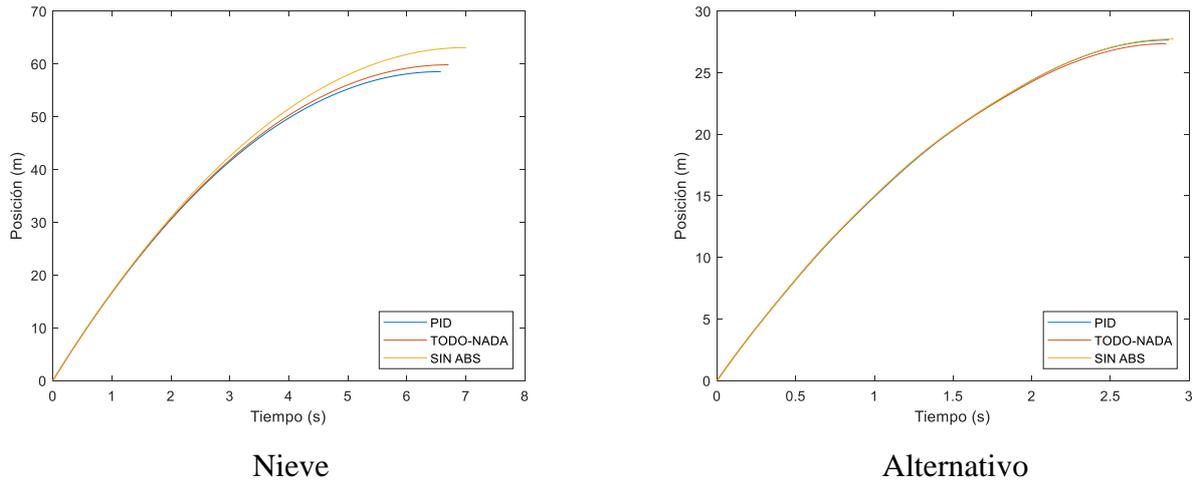


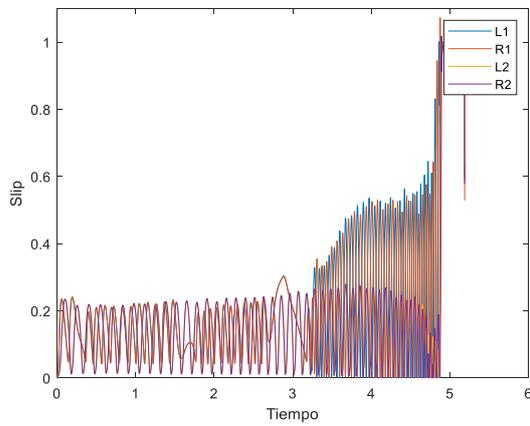
Figura 4-2 Gráficas comparativas de posición a 65 km/h

#### 4.2 Experimentos por tipo de control y velocidad y en condiciones fijas

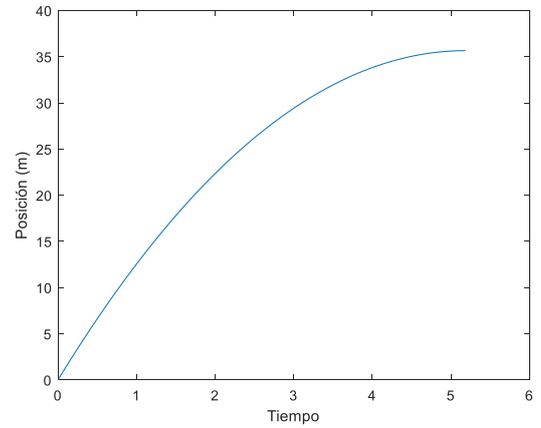
Para poder observar de una manera notoria las diferencias entre la eficacia de los ABS a altas y bajas velocidades, se ha decidido realizar el siguiente experimento, en el que el mismo coche del apartado 4.1 se somete a pruebas a diferentes velocidades iniciales y en condiciones de nieve, es decir, con un coeficiente de rozamiento de ( $\mu = 0,3$ ). Las velocidades iniciales seleccionadas son de 50 km/h y 120 km/h, debido a que son las velocidades máximas de conducción en zona urbana y en autopista/autovía respectivamente.

### 4.2.1 Experimentos a 50 km/h

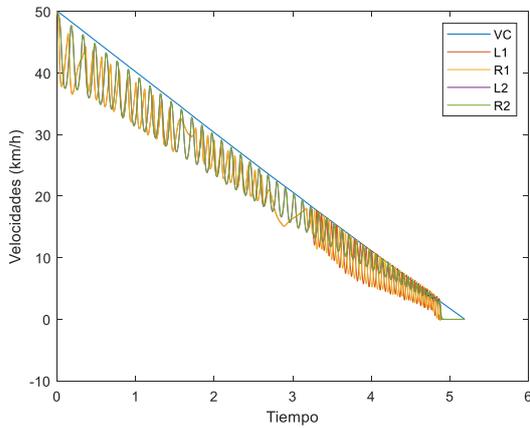
#### 4.2.1.1 Control Todo-Nada



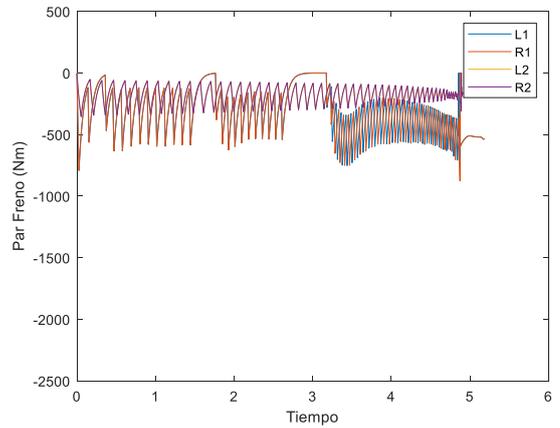
**Slip (slipCS)**



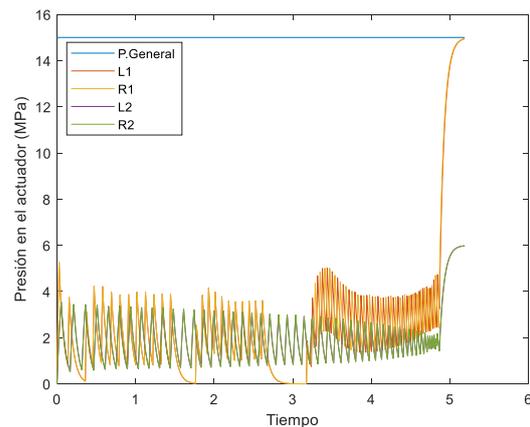
**Posición (PosCS)**



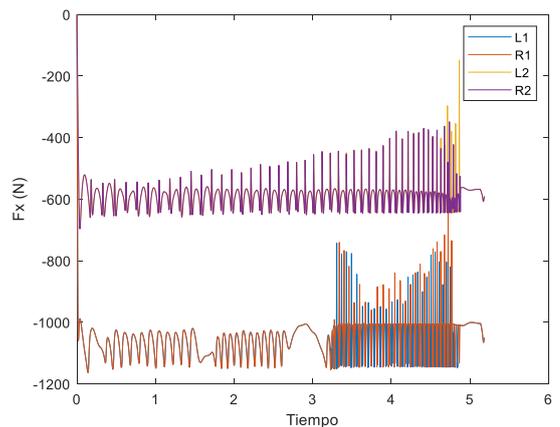
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



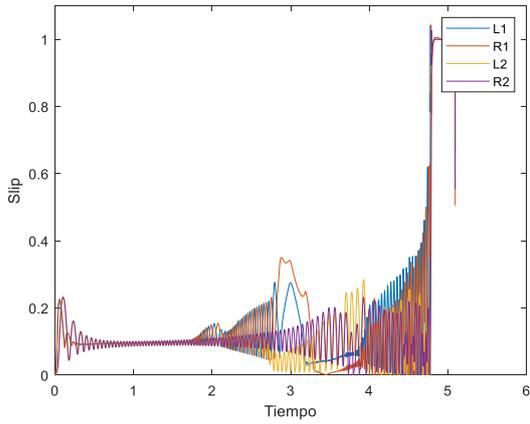
**Presión del actuador (PresCS)**



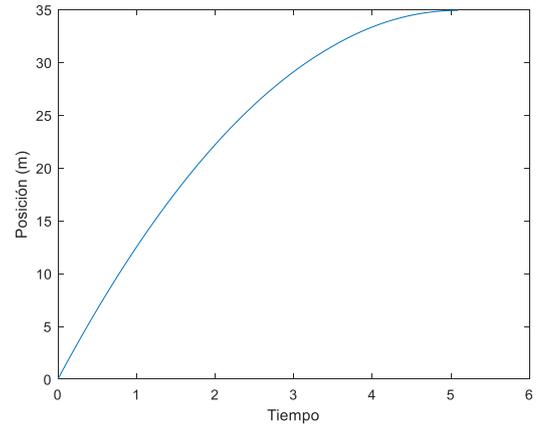
**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-13 Control Todo-Nada a 50 km/h**

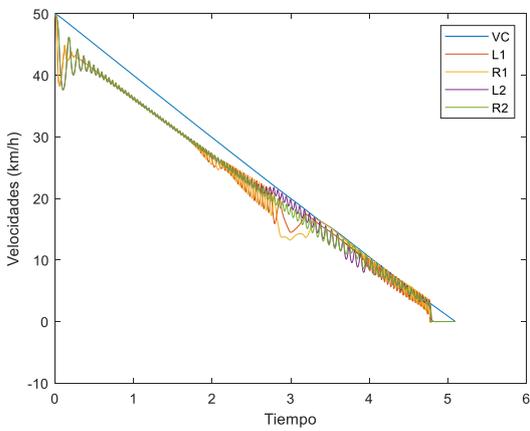
### 4.2.1.2 Control PID



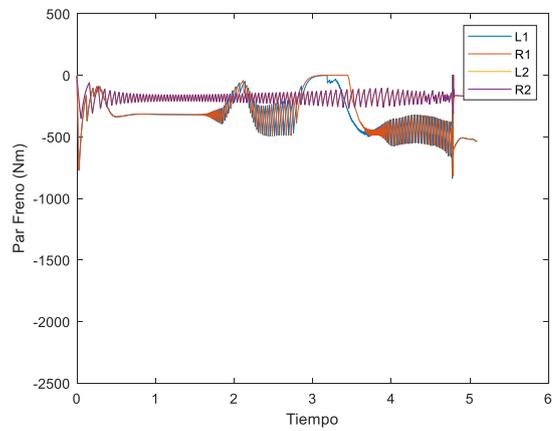
**Slip (slipCS)**



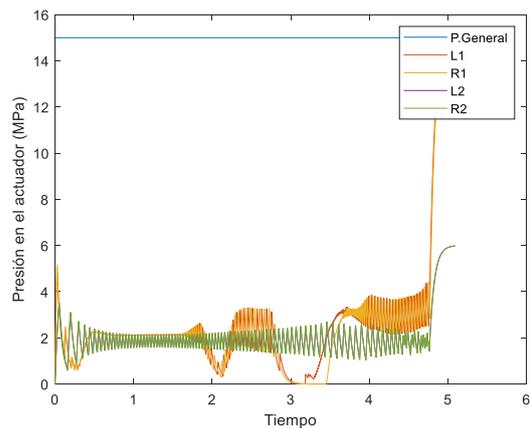
**Posición (PosCS)**



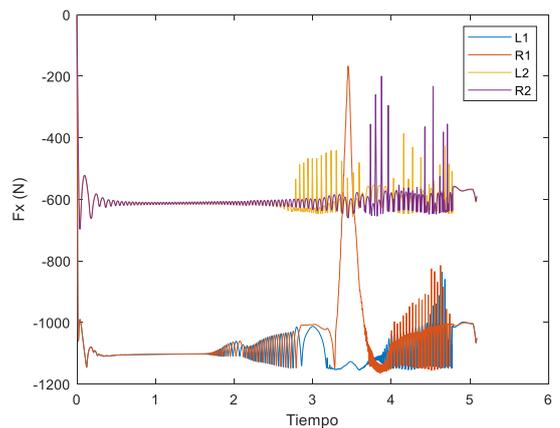
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



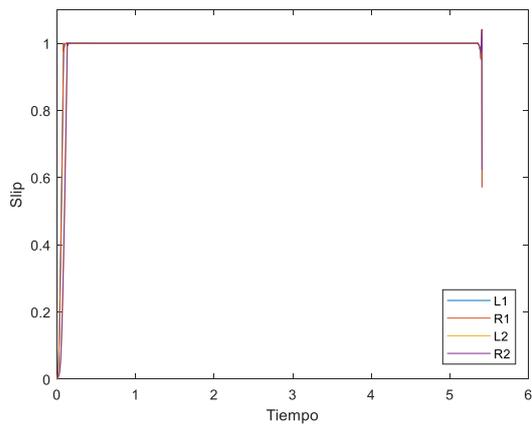
**Presión del actuador (PresCS)**



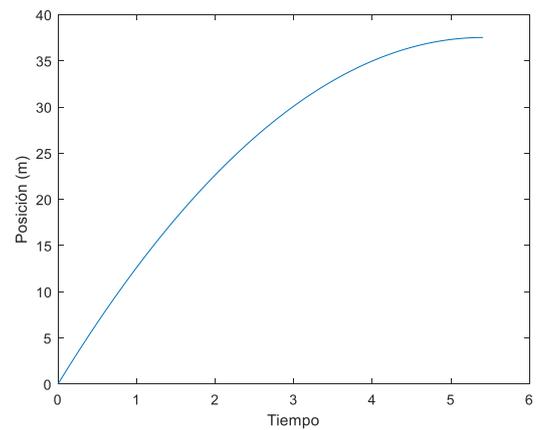
**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-14 Control PID a 50 km/h**

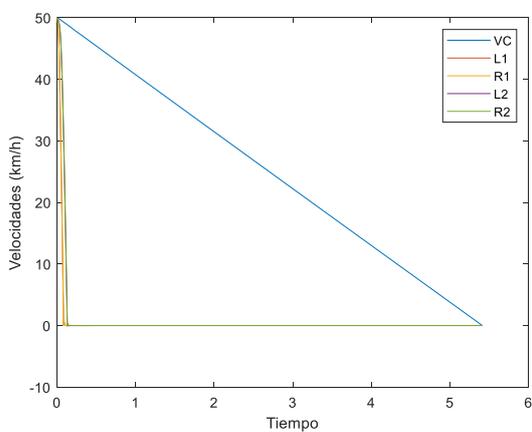
### 4.2.1.3 Sin control ABS



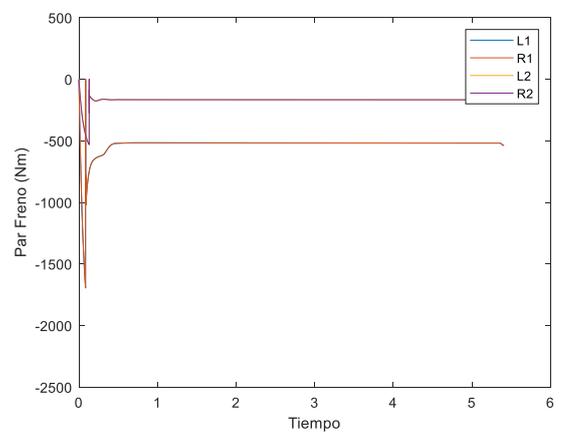
**Slip (slipCS)**



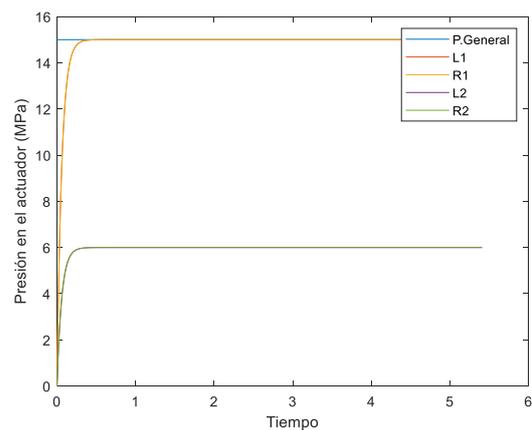
**Posición (PosCS)**



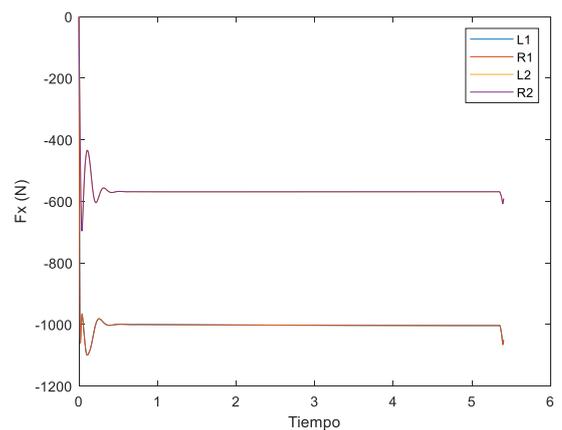
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



**Presión del actuador (PresCS)**

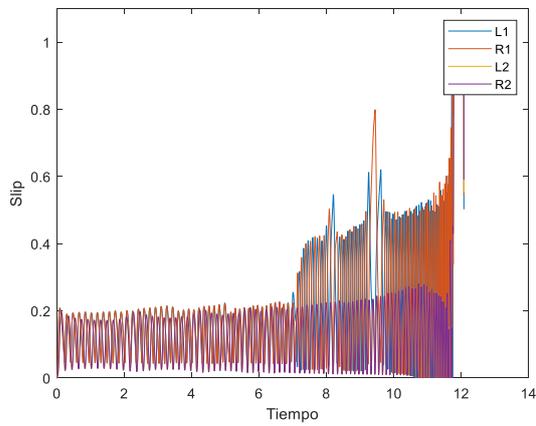


**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

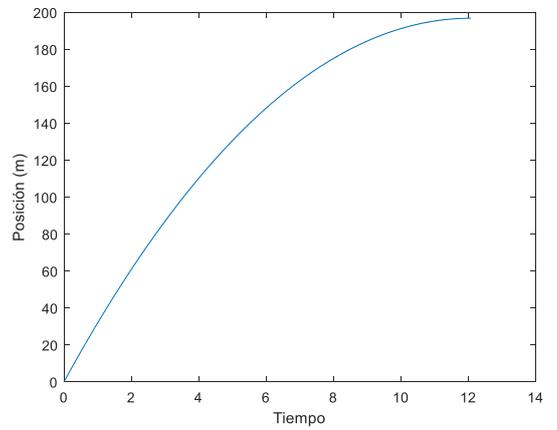
**Tabla 4-15 Modelo sin control ABS a 50 km/h**

### 4.2.2 Experimentos a 120 km/h

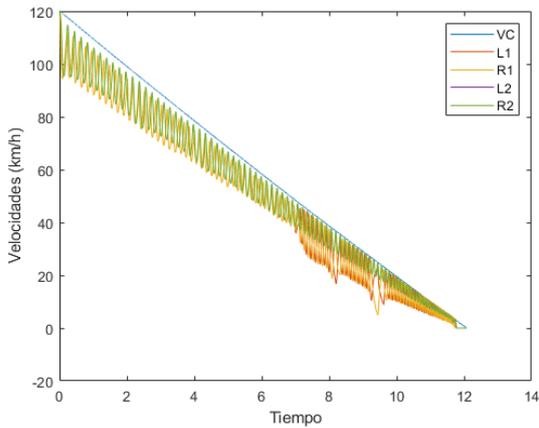
#### 4.2.2.1 Control Todo-Nada



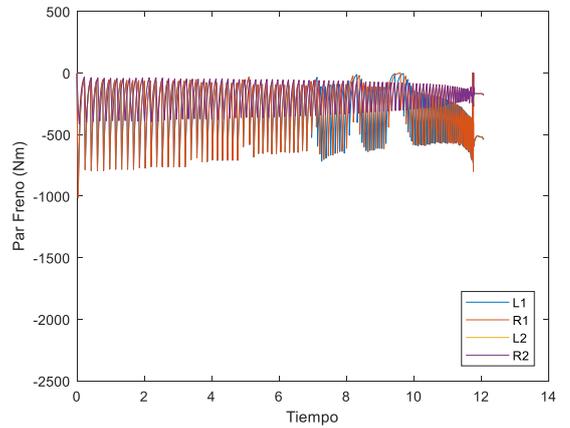
**Slip (slipCS)**



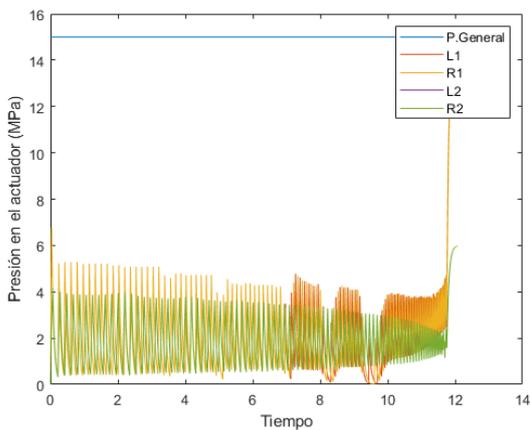
**Posición (PosCS)**



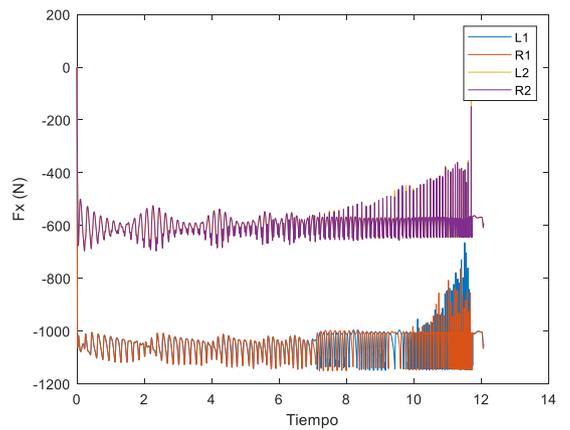
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de freno (TbCS)**



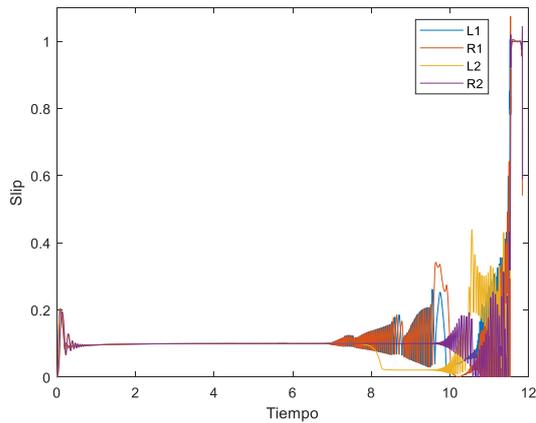
**Presión del actuador (PresCS)**



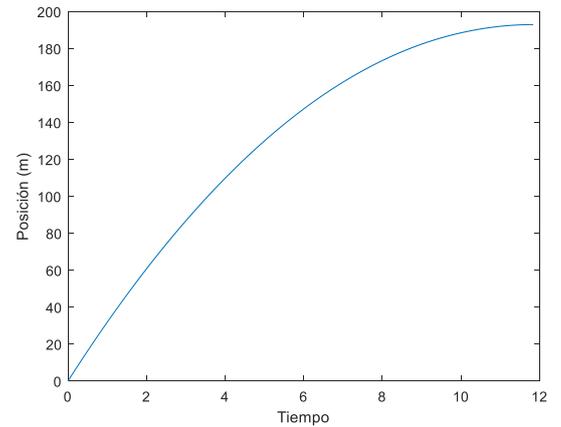
**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-16 Control Todo-Nada a 120 km/h**

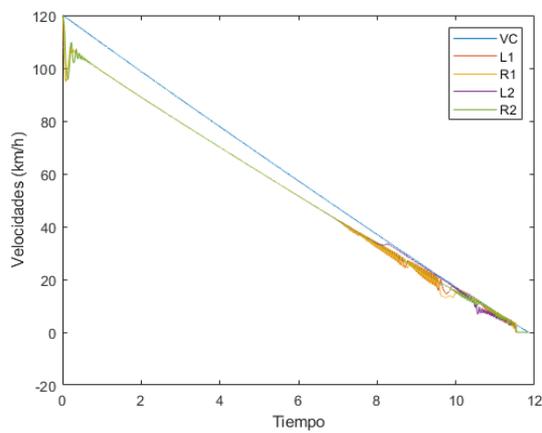
### 4.2.2.2 Control PID



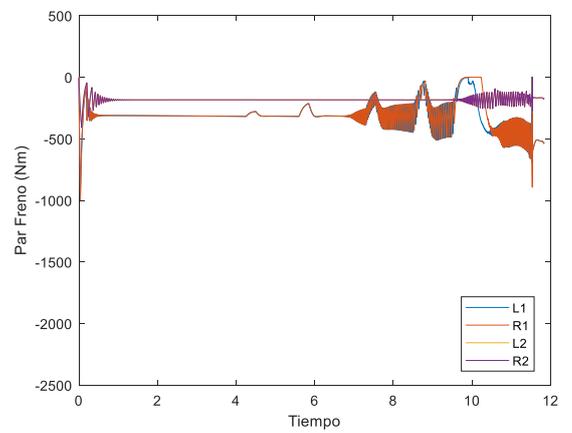
**Slip (slipCS)**



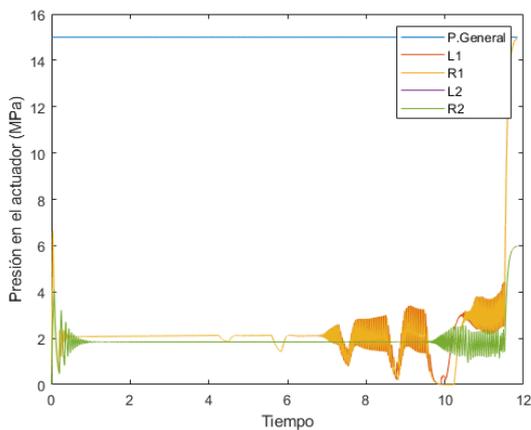
**Posición (PosCS)**



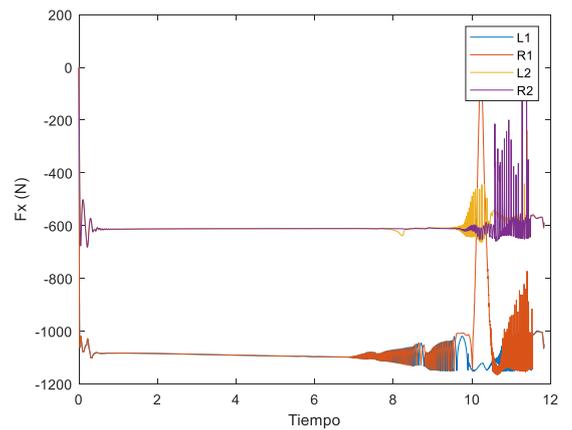
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



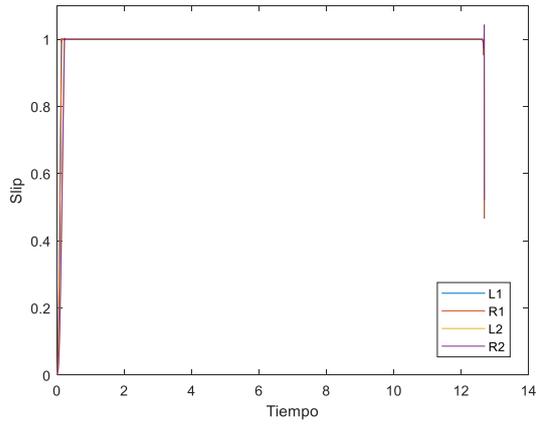
**Presión del actuador (PresCS)**



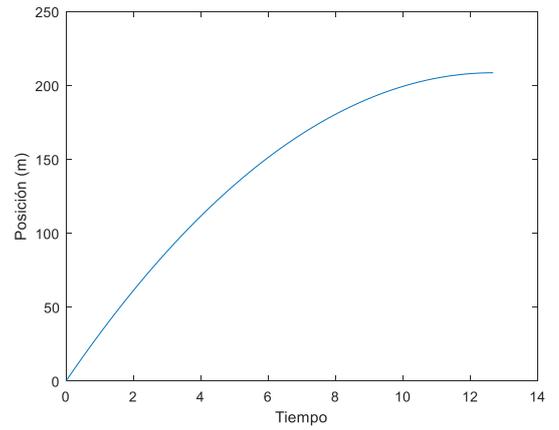
**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-17 Control PID a 120 km/h**

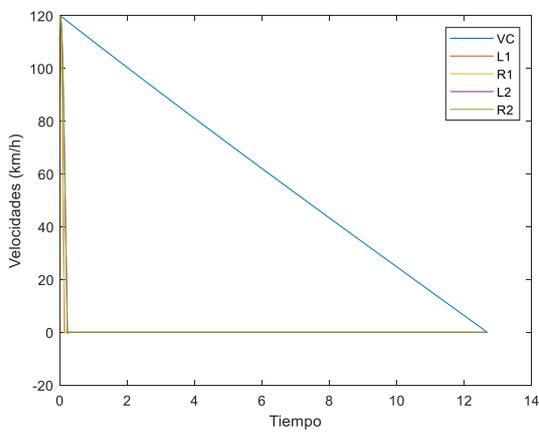
### 4.2.2.3 Sin control ABS



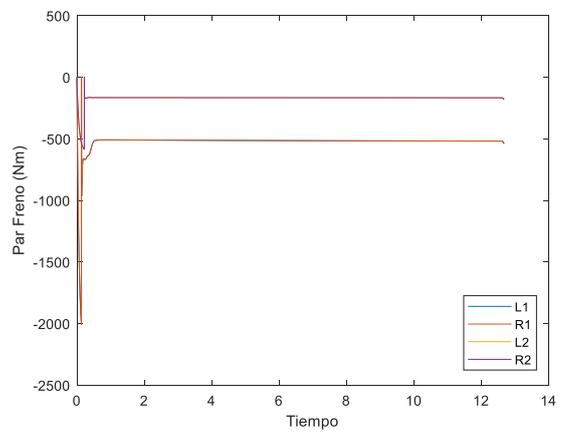
**Slip (slipCS)**



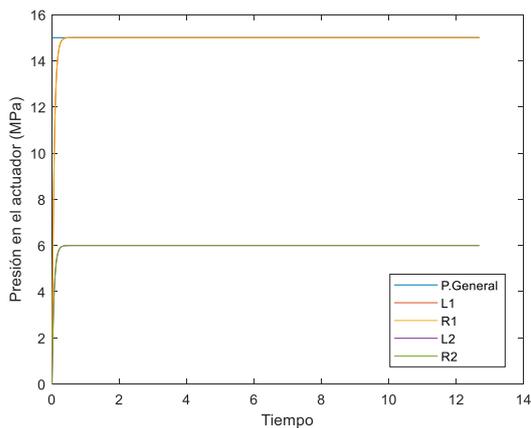
**Posición (PosCS)**



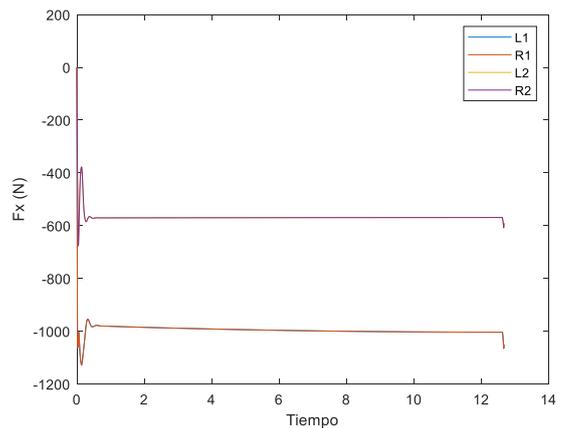
**Velocidades de coche y ruedas (velCS)**



**Par de frenado (TbCS)**



**Presión del actuador (PresCS)**



**Fuerza de rozamiento (FxCS)**

**Tabla 4-18 Modelo sin control ABS a 120 km/h**

### 4.2.3 Comentario

Para la comparación de las gráficas de estos experimentos se ha decidido organizar los resultados por tablas en lugar de por gráficas, ya que las diferencias entre tiempo de frenado y distancia de frenado a las diferentes velocidades son evidentes en este experimento, como podemos ver en la Tabla 4-19.

	Tiempo de frenada (s)		Distancia de frenado (m)	
	50km/h	120 km/h	50km/h	120 km/h
SIN ABS	5.408	12.685	37.53	208.68
Control PID	5.091	11.843	34.93	193.01
Control Todo-Nada	5.187	12.079	35.65	196.88

**Tabla 4-19 Comparativa de tiempos y distancias de frenado a 50 km/h y 120 km/h**

Como podemos observar en la Tabla 4-20, las velocidades iniciales no tienen casi efecto alguno en la aceleración de frenado, ya que se mantienen prácticamente constantes independientemente de la velocidad. También puede observarse que la menor aceleración de frenado es la del vehículo sin ABS, mientras que la mayor es la del vehículo con esquema de control PID. Se puede concluir, por lo tanto, que la velocidad a la que el vehículo vaya a accionar el sistema ABS no es un factor determinante a la hora de la elección del tipo de control, ya que lo que verdaderamente influye en la aceleración del frenado es la adherencia del neumático a la superficie de rodadura, que crea a su vez la fuerza de fricción, que es la que finalmente permite el frenado. El controlador que consigue la mejor tasa de adherencia media es el control PID, ya que su aceleración media es mayor.

	Aceleración media (m/s <sup>2</sup> )	
	50km/h	120 km/h
SIN ABS	-2,568	-2,627
Control PID	-2,728	-2,814
Control Todo-Nada	-2,677	-2,759

**Tabla 4-20 Aceleración de frenado en cada esquema de control**

## 5 CONCLUSIONES

Como hemos podido ver, existen muchos sistemas de seguridad eficaces en los vehículos modernos, desde asistentes a la conducción, pasando por airbags hasta los cinturones de seguridad. Sin embargo, en el momento de prevenir un accidente, es crucial contar con un tiempo de reacción adecuado que nos permita solventar la situación de emergencia, y en esta problemática, el ABS nos permite contar con unas décimas de segundo de suma importancia. Tanto es así, que como sistema de seguridad lleva mucho tiempo siendo un requisito indispensable para los vehículos de serie en muchos países.

Para comprender en profundidad el comportamiento del vehículo por el espacio, se ha estudiado su dinámica y la traducción de esta a un lenguaje matemático, observando que existen diversos modelos en función del punto de referencia (modelo vertical, modelo lateral y modelo longitudinal). En este trabajo se ha hecho hincapié en el modelo longitudinal, ya que únicamente se pretendía estudiar el efecto del ABS sobre el tiempo y la distancia de frenado, no sobre su efecto en la maniobrabilidad del coche. Todo esto ha permitido diseñar un modelo matemático de vehículo en Simulink que en cierta manera emula al de CarSim. Para el diseño de este modelo cabe destacar la importancia de la “fórmula mágica de Pacejka” que proporciona a través de una simple fórmula la relación entre el neumático y la superficie de rodadura, en otras palabras, da la relación que existe entre el deslizamiento y el coeficiente de rozamiento, proporcionando así un modelo de neumático válido.

El buen funcionamiento de un sistema ABS depende de muchos factores, entre los que se encuentra principalmente un buen control que mantenga el valor del deslizamiento entre unos márgenes adecuados para la frenada, y unos actuadores que permitan ejercer la presión necesaria sobre la pastilla de freno. Como se ha visto, existen tres tipos de esquemas de control válidos para los frenos ABS, esquemas de control Todo-Nada, PID y avanzados, estudiando en este trabajo los esquemas tipo Todo-Nada y PID principalmente, por su simplicidad. Por otro lado, los actuadores de frenos, con sus pros y sus contras, se dividen en cuatro grupos principales, actuadores neumáticos, hidráulicos, eléctricos y mecánicos, siendo los más utilizados en automoción los actuadores hidráulicos y eléctricos.

Ha sido necesario contar con un software de simulación adecuado para la realización de las pruebas, y aunque se ha visto que existen gran cantidad de programas que ofrecen la posibilidad de realizar este tipo de simulación (como por ejemplo veDyna, DynaCar o Matlab Simscape), en este trabajo se ha decidido utilizar CarSim para establecer los parámetros del vehículo y las circunstancias del entorno en los ensayos, y Matlab/Simulink para llevar a cabo el diseño de los esquemas de control y efectuar las pruebas que se han llevado a cabo.

Una vez que se conocen todos los componentes que intervienen en el proceso de un frenado con ABS, se ha creado un banco de pruebas en CarSim con la intención de poner a prueba los distintos tipos de controlador en diferentes condiciones del entorno. Crear un banco de pruebas se traduce en establecer los parámetros del coche que se va a utilizar en los ensayos, establecer también las condiciones del entorno empleadas, y a su vez fijar los parámetros generados por CarSim que se deberán traspasar a Simulink para su uso en el control del vehículo.

Para generar un modelo matemático longitudinal del vehículo, ha sido necesario poder compararlo con su gemelo de CarSim en las mismas condiciones. En este caso, las condiciones han sido de coeficiente de rozamiento perfecto ( $\mu = 1$ ) y una velocidad de 65 kilómetros por hora. Una vez realizado el modelo, se fijaron los parámetros con el fin de mejorar el parecido entre los modelos de Simulink y de CarSim.

Posteriormente a la realización del modelo se llevaron a cabo las pruebas experimentales para determinar la eficacia en frenados longitudinales con los diferentes controladores, dividiéndose las pruebas en los cuatro entornos explicados anteriormente y a diferentes velocidades iniciales. Se han aplicado los dos tipos de control ABS comentados anteriormente sobre el simulador CarSim y se han comparado con la respuesta del vehículo sin ABS. Los ensayos realizados para diferentes características

de entorno muestran un resultado esperado como muestran las gráficas comparativas del apartado de resultados.

El control del frenado reduce la distancia y el tiempo de frenado. En todas las gráficas es una constante el hecho de que se vayan reduciendo tiempos y distancias gracias a la aplicación de un control para obtener la adherencia óptima del vehículo. Aunque estos controles variarían su efecto en coches con características diferentes, solo haría falta un pequeño reajuste de los parámetros del controlador para obtener de nuevo los resultados deseados, por lo que es extrapolable a la aplicación sobre los vehículos de la armada. Se puede concluir que, excepto en el caso del entorno alternativo, el esquema de control que mejor se adapta a las exigencias del ABS es el PID debido al mejor ajuste de deslizamiento que se consigue, por lo tanto, de la adherencia entre neumático y carretera.

## 5.1 Líneas futuras

Como líneas futuras de continuación de este trabajo se plantean las siguientes:

- Estudiar el frenado con un modelo de 2 grados de libertad, para observar las consecuencias de frenadas en curva o con tramos con distintos coeficientes de rozamiento pero en el lado izquierdo y derecho del vehículo.
- Aplicación de otras técnicas de control que permitan alcanzar el valor adecuado de deslizamiento más rápidamente, y con ello bajar el tiempo y la distancia de frenado, por ejemplo, un esquema de control SMC (Sliding Mode Control).
- Coordinar un control general que aúne el control ABS con el control de suspensiones semi-activas.
- Estudiar la eficacia de los controladores actuales en los vehículos militares utilizados en las Fuerzas Armadas españolas, como en el caso de la Infantería de Marina, el URO VAMTAC.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. A. Aly, E.-S. Zeidan, A. Hamed and F. Salem, "An Antilock-Braking Systems (ABS) Control: A Technical Review," *Scientific Research*, vol. 2, pp. 186-195, 2011.
- [2] I. Petersen, *Wheel Slip Control in ABS Brakes using Gain Scheduled Optimal Control with Constrains*, Trondheim: Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 2003.
- [3] D. Burton, A. Delaney, S. Newstead, D. Logan and B. Fildes, *Effectiveness of ABS and Vehicle Stability Control Systems*, Victoria: Royal Automobile Club of Victoria, 2004, p. 56.
- [4] H. G. Tejada, *Estudio comparativo del comportamiento de un vehículo mediante un modelo simplificado y el software comercial CarSim*, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2016.
- [5] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, Austin: Springer, 2006.
- [6] M. Cerdeira-Corujo, A. Costas, E. Delgado, A. Barreiro y A. Baños, *Gain-scheduled wheel slip reset control in Automotive Brake Systems*, Anacapri: International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2016.
- [7] T. Sardarmehni, H. Rahmani y M. B. Menhaj, *Robust control of wheel slip in anti-lock brake system of automobiles*, Dordrecht: Springer+Business Media, 2013.
- [8] Y. Lee y S. H. Zak, «Designing a genetic neural fuzzy antilock-brake-system controller,» *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 6, nº 3, pp. 198-211, 2002.
- [9] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Madrid: Pearson Educación, 2010.
- [10] K.-C. Lee, J.-W. Jeon, D.-H. Hwang y Y.-J. Kim, *Performance Evaluation of Antilock Brake Controller for Pneumatic Brake System*, M. C. A. A. R. Group, Ed., Changwon, Gyeongnam: Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), 2003.
- [11] O. C. Emereole y M. C. Good, *Comparison of the Braking Performance of Electromechanical and Hydraulic ABS Systems*, Orlando, Florida: 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2005.
- [12] D. Yun, H. Kim y K. Boo, «Brake Performance Evaluation of ABS with Sliding Mode Controller on a Split Road with Driver Model,» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 12, nº 1, pp. 31-38, 2009.
- [13] M. Cerdeira-Corujo, A. Costas, E. Delgado y A. Barreiro, *Comparative Analysis of Gain-Scheduled Wheel Slip Reset Controllers with Different Reset Controllers with Different Reset Strategies in Automotive Brake Systems*, Vigo: Springer, 2017.
- [14] S. Checkoway, D. McCoy, B. Kantor, D. Anderson, H. Schacham, S. Savage, K. Koscher, A. Czeskis, F. Roesner y T. Kohno, *Comprehensive Experimental Analyses of Automotive Attack Surfaces*, San Francisco: 20th USENIX conference on security, 2011.
- [15] K. H. Ang, G. Chong y Y. Li, *PID Control System Analysis, Design and Technology*, Glasgow: University of Glasgow, 2007.

- [16] K. Koscher, A. Czeskis, F. Roesner, S. Patel, T. Kohno, S. Checkoway, D. McCoy, B. Kantor, D. Anderson, H. Shacham y S. Savage, *Experimental Security Analysis of a Modern Automobile*, Berkely: IEEE Symposium on Security and Privacy, 2010.
- [17] P. Falcón, M. Cerdeira, E. Delgado, M. Diaz-Cacho y A. Barreiro, *Modelado y Control Reset de una Planta ABS Experimental*, Vigo: Universidade de Vigo, 2018.